



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МИНЕРАЛЬНОГО  
СЫРЬЯ им. Н.М. ФЕДОРОВСКОГО» (ФГБУ «ВИМС»)

*На правах рукописи*

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'P. Ivanovich', written over a horizontal line.

КУШНАРЕВ ПЕТР ИВАНОВИЧ

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ РАЗВЕДАННОСТИ  
ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Специальность 1.6.10

«Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения»

Диссертация на соискание степени учёной степени доктора  
геолого-минералогических наук

г. Москва, 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ИЗУЧЕННОСТИ И КЛАССИФИКАЦИИ ЗАПАСОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЁРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.....	11
1.1 Основные понятия и положения .....	11
1.2 Факторы, определяющие разведанность запасов.....	14
1.3 Требования к разведанности и квалификации запасов/ресурсов .....	17
1.3.1 Краткий исторический обзор .....	17
1.3.2 Требования к разведанности запасов в Российской Федерации .....	18
1.3.3 Классификация запасов в шаблоне КРИРСКО .....	22
1.3.4 Сопоставление принципов оценки и классификации запасов/ресурсов в России и по шаблону КРИРСКО .....	25
2. СВОЙСТВА РУДНЫХ ОБЪЕКТОВ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ИЗУЧЕНИЯ.....	28
2.1 Изучение морфологии рудных образований .....	28
2.1.1 Общие положения .....	28
2.1.2 Принципы описания морфологии рудных объектов .....	29
2.1.3 Характеристика объектов низких масштабных уровней.....	30
2.1.4 Характеристика морфологии рудных тел.....	37
2.2 Изучение изменчивости геологоразведочных параметров .....	43
2.2.1 Статистический анализ.....	43
2.2.2 Геостатистический анализ и основы блочного моделирования .....	50
2.3 Использование положений фрактальной геометрии при решении задач разведки и оценки месторождений .....	62
2.3.1 Изучение морфологии оруденения на основе принципов фрактальной геометрии	63
2.3.2 Фрактальная геометрия при изучении свойств месторождений .....	71
3. ОЦЕНКА СЛОЖНОСТИ СТРОЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ.....	79
3.1 Существующие подходы к оценке сложности строения рудных объектов.....	79
3.2 Используемые количественные показатели при описании морфологии объектов.....	81
3.3 Совершенствование группировки месторождений по сложности строения.....	89
3.3.1 Рекомендуемые количественные показатели сложности строения золоторудных объектов.....	89
3.3.2 Объекты оценки сложности геологического строения.....	92
4. МЕТОДЫ ОБОСНОВАНИЯ РАЗВЕДОЧНОЙ СЕТИ.....	96
4.1 Основные понятия .....	96

4.2	Подходы к обоснованию плотности разведочной сети в отечественной практике недропользования.....	97
4.2.1	Точность оценки подсчетных параметров.....	99
4.2.2	Использование ошибок геометризации при обосновании разведочной сети .....	103
4.3	Принципы выбора параметров сети в зарубежных стандартах .....	108
4.4	Предложения по совершенствованию обоснования разведочной сети .....	111
4.4.1	Обоснование параметров сети с позиций погрешности оценки запасов.....	111
4.4.2	Обоснование сети с использованием метода разрежения.....	117
4.4.3	Оценка ошибок геометризации на основе положений фрактальной геометрии ...	122
4.4.4	Оценка ошибок геометризации с использованием вариограмм.....	131
5.	КРИТЕРИИ РАЗВЕДАННОСТИ И ИХ ДОПУСТИМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ КАТЕГОРИЙ ЗАПАСОВ.....	135
5.1	Анализ разведанности месторождений с позиций погрешности оценки параметров подсчета.....	136
5.2	Анализ разведанности месторождений на основе ошибок геометризации .....	146
5.3	Экономическое обоснование значений критериев разведанности.....	149
5.4	Влияние критериев на оценку месторождения.....	153
5.5	Типизация золоторудных месторождений для целей оценки и разведки.....	154
6.	КВАЛИФИКАЦИЯ ЗАПАСОВ.....	158
6.1	Основные положения квалификации запасов/ресурсов в отечественной и зарубежной практике оценки .....	158
6.2	Квалификация запасов на количественной основе - предлагаемый подход .....	165
6.3	Сопоставление результатов квалификации запасов/ресурсов на основе зарубежных, отечественных и рекомендуемого подходов .....	169
	Список сокращений .....	181
	Список литературы .....	182

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы** определяется отсутствием единообразных подходов к оценке разведанности запасов/ресурсов месторождений на количественной основе. В настоящее время основным способом ее решения продолжает оставаться метод экспертных оценок. В отечественной практике изучения недр он используется специалистами, ведущими геологоразведочные работы, и корректируется экспертами ГКЗ или сотрудниками специализированных консалтинговых, научных и производственных организаций. За рубежом эту задачу решают главным образом Компетентные Персоны, являющие членами признанных международных сообществ.

Сопоставление отечественных категорий запасов с категориями, принятыми за рубежом, далеко не всегда бывает однозначным, при этом возникают разногласия, объективное разрешение которых возможно только на базе одинаково понимаемых показателей или критериев разведанности.

Проблема оценки разведанности запасов/ресурсов тесно связана с обоснованием параметров (геометрии) разведочной сети и квалификацией запасов по отдельным объектам и блокам.

**Целью представленной работы** является разработка методов количественной оценки разведанности запасов коренных золоторудных месторождений с учетом сложности их геологического строения.

**Основные задачи.** Для достижения поставленной цели решались следующие взаимосвязанные задачи:

- анализ требований к изученности месторождений и классификации запасов/ресурсов в отечественной и зарубежной практике ведения геологоразведочных работ;
- сравнение отечественных и зарубежных подходов к определению разведанности месторождений;
- исследование свойств оруденения на месторождениях различных морфологических типов;
- анализ возможности использования современных передовых подходов к изучению свойств объектов, в том числе положений фрактальной геометрии и геостатистики;
- анализ и определение количественных показателей для характеристики свойств природных объектов и оценки сложности их строения;
- анализ методов обоснования геометрии разведочной сети;



- разработка процедуры расчета параметров сети на количественной основе с учетом стадий геологоразведочных работ;
- выбор критериев разведанности и оценка их предельных значений для запасов разных категорий;
- разработка типизации золоторудных месторождений для целей разведки;
- анализ методов квалификации запасов, разработка приемов определения категории в конкретных условиях.

Решение этих задач предлагается на основе изучения опыта ведения геологоразведочных работ в России и за рубежом, проведения статистических, геостатистических и морфологических исследований на объектах различных типов.

#### **Методы исследований:**

Анализ практического опыта оценки месторождений, обобщение данных публичной отчетности, научно-технической литературы (отечественной и иностранной), статистический анализ, геостатистические исследования и блочное моделирование, графический анализ ошибок геометризации с оценкой размерности объектов на основе положений фрактальной геометрии. В качестве инструмента выполнения расчетов использована разработанная методика.

#### **Научная новизна работы** характеризуется следующими положениями:

1. Обоснован выбор признаков, характеризующих с количественных позиций сложность геологического строения золоторудных объектов, в том числе: масштаб объектов, морфологический тип, степень изменчивости содержаний по пробам равной длины или по композитам;
2. Доказаны возможности применения принципов фрактальной геометрии для решения задач разведки и оценки месторождений, количественного описания на этой основе морфологических и других свойств объектов;
3. Определены показатели для описания морфологии рудных тел, выявлена их связь с фрактальной размерностью при разных масштабах измерений. Установлены аналитические выражения, описывающие взаимосвязь показателей с ошибками геометризации и шагом разведочной сети;
4. Исследованы возможности и условия применения способов оценки изменчивости содержаний, оценено влияние асимметричности и ограничения распределений, а также закономерных изменений признака на результаты определения точности погрешности средних значений. Установлена недопустимость применения для этих целей вариабельности содержаний по разведочным пересечениям;
5. Обоснованы приемы аналитического расчета параметров разведочной сети при разных требованиях к точности оценки средних содержаний для запасов определенных категорий,

установлена роль годовой/квартальной производительности предприятия как фактора определения параметров разведочной сети, рассмотрены возможности применения процедуры их расчета на ранних стадиях геологоразведочных работ;

6. Разработаны способы оценки ошибок геометризации при отсутствии участков детализации, в том числе с использованием фрактальной размерности; определена роль вариограмм индикатора как показателя размеров рудных тел при разных значениях бортовых лимитов;

7. Выявлены критерии разведанности запасов, определена их связь с параметрами разведочной сети, показателями изменчивости свойств и морфологическими характеристиками оруденения, отмечена универсальность критериев для различных классификаций;

8. На основе опыта разведки и требований промышленности для золоторудных месторождений установлены предельные значения критериев разведанности для запасов разных категорий, определена зависимость значений критериев от экономических рисков освоения объектов;

9. Разработаны принципы количественной квалификации запасов в отдельных подсчетных блоках с учетом результатов проведенных разведочных работ и выявленных свойств оруденения.

#### **Объекты исследований:**

В основу решения поставленных задач положены фактические данные по геологическому строению, разведке и отработки ряда золоторудных месторождений, таких как: Наталка, Сухой Лог, Олимпиадинское, Вернинское, Дегдекан, Голец Высочайший, Тарынское, Дrajное, Павлик, Чертово Корыто, Каральвеем, Бамское, Кючус, Нежданинское, Кундуми, Талгия, Александровское, Кочкарское, Воронцовское Сергеевское, Боголюбовское, Благодатное, Титимухта, Ключевское, Коммунар, Куранахское рудное поле и др.

Золоторудные месторождения выбраны в качестве основных объектов исследований в связи с тем, что в последнее время, начиная с 1992 г., материалы по ним чаще всего представлялись на Государственную экспертизу, эти же объекты впоследствии наиболее интенсивно отрабатывались. В данный период значительная часть золоторудных месторождений открыта и разведана (Дегдекан, Купол, Албазинское, Пионер, Маломыр, Светлинское, Албын, Боголюбовское, Благодатное, Титимухта, и др.). Многие объекты, в том числе Наталка, Вернинское, Сухой Лог, Олимпиадинское, Павлик, Бамское, Нежданинское и другие, в результате проведенных геологоразведочных работ получили коренную переоценку.

Автор принимал личное участие в проведении геологоразведочных работ и в обработке данных по ним с представлением материалов в ГКЗ РФ на месторождениях Наталкинское, Дегдекан, Вернинское, Чертово Корыто, Каральвеем, Павлик, Бамское, Нежданинское,

Боголюбовское, Кючус, Дrajное, Сергеевское, Светлинское, Куранахское рудное поле. Результаты их изучения частично отражены в публикациях [15, 19, 21, 49, 64]. В период с 1985 по 1991 гг. участвовал в научно-исследовательских работах на золоторудных месторождениях Узбекистана: Амантайтау, Даугызтау, Зармитан, Кзылалма, Кайрагач, Кочбулак, – и России: Коммунар, Кочкарское, Воронцовское. Результаты этих исследований также учитывались в обосновании выводов данной работы.

В качестве внештатного эксперта ГКЗ составлял экспертные заключения по упомянутым объектам, а также по месторождениям Покровское, Пионер, Майское, Многовершинное, Хаканджа, Голец Высочайший, Дукат, Зун-Холба, Дарасун, Березняковское, Александровское, Бараньевское рудное поле, Албазинское, Многовершинное, Асачинское, Озерновское, Благодатное, Бадран, Березитовое, Березовское, Тасеевское, Золотая Речка и др.

При решении отдельных вопросов данной работы привлекалась также информация, полученная в процессе составления экспертных заключений по месторождениям других видов минерального сырья: меди, молибдена, вольфрама, урана, редких земель, а также россыпных месторождений. Широко использовался опыт изучения и квалификации запасов/ресурсов золоторудных месторождений за рубежом на основе документов публичной отчетности.

Проведенные исследования включают расчеты статистических и геостатистических характеристик изучаемых объектов, определение ошибок геометризации, анализ результатов сопоставления данных разведки и эксплуатации, расчеты по разрежению разведочной сети. Новым направлением исследований в области морфологической характеристики рудных объектов является изучение их фрактальной размерности.

Ошибки геометризации исследовались на обрабатываемых объектах или на объектах, имеющих участки детализации. На этих же объектах проводились исследования фрактальной размерности, а также разрежение разведочной сети.

Статистические и геостатистические исследования с разной степенью детальности проведены практически на всех упомянутых объектах, значительная часть расчетов выполнена автором.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

К защите предлагаются следующие тезисные положения:

1. При количественной оценке сложности геологического строения золоторудных месторождений необходимо и достаточно рассматривать в качестве классификационных признаков масштаб изучаемых объектов, морфологию рудных скоплений, включая определение типа и фрактальной размерности, и изменчивость содержаний в пробах равной длины или в композитах. Оценка сложности строения может проводиться для месторождения в целом или для

его частей, различающихся условиями отработки, особенностями морфологии и характеристиками изменчивости оруденения;

2. Параметры разведочной сети должны обеспечивать достижение заданной точности оценки запасов и на надежность их геометризации. Точность оценки средних содержаний относится к количеству руды, сопоставимому с годовой/квартальной производительностью предприятия. Она вычисляется через дисперсию случайной составляющей изменчивости, определяемой на основе статистических и геостатистических исследований.

Оценку ошибок геометризации, особенно на ранних стадиях геологоразведочных работ, предлагается проводить с применением аналитических выражений, использующих данные геостатистического анализа и показатели фрактальной размерности объектов;

3. Проведенными исследованиями впервые установлено, что фактический уровень относительных стандартных погрешностей оценки содержаний для категории  $C_1$  применительно к блокам, сопоставимым с объемами годовой производительности, и находится в пределах 10 % - 15 %, что можно считать допустимым для планирования ГРП на ранних стадиях. Значения этого критерия для конкретных объектов могут корректироваться также в зависимости от масштаба и уровня экономических рисков их освоения.

Фактические значения ошибок геометризации золоторудных месторождений для запасов категории  $C_1$  составляют 30 % - 50 %, что соответствует их уровню для других типов месторождений. Эти лимиты предлагается принять для количественной оценки разведанности запасов данной категории;

4. Квалификация запасов в подсчетных блоках золоторудных месторождений с позиции точности оценки средних содержаний требует изучения изменчивости на локальных участках и введения поправок, учитывающих различие в запасах блока с рудными объемами недр, сопоставимыми с годовой, полугодовой или квартальной производительностью предприятия.

Квалификация запасов по блокам корректируется с учетом величины ошибок геометризации, определяемых по характеристикам вариограмм индикаторов или другими методами.

**Теоретическая и практическая значимость.** Теоретические положения, разработанные автором и используемые в работе:

– доказана необходимость оценки изменчивости содержаний по пробам или композитам для целей обоснования разведочной сети;

– показана возможности использования формул математической статистики в условиях несоответствия распределения содержаний нормальному закону для определения точности оценки средних содержаний при большом объеме выборок;

- установлена связь фрактальной размерности  $D$  геологических объектов с их морфологическими типами;
- определены аналитические выражения для использования величины  $D$  при расчетах ошибок геометризации при отсутствии участков детализации.
- определено влияние масштаба объектов и способов его отработки, а также устойчивости проекта освоения месторождения (уровня геологического риска) на требования к величине критериев разведанности.

**Практическое значение** работы состоит в разработке следующих аспектов оценки разведанности месторождений:

1. Даны рекомендации по способам оценки фрактальной размерности объектов и определению на этой основе морфологических характеристик оруденения;
2. Представлены рекомендации по изучению изменчивости содержаний на основе статистического и геостатистического анализов;
3. Разработана процедура расчета параметров разведочной сети, которая позволяет учитывать разные требования к величине критериев разведанности;
4. Предложены приемы проведения работ по разрежению разведочной сети и интерпретации их результатов;
5. Предложена типизация золоторудных месторождений по сложности строения, в основу которой положены рассмотренные выше характеристики и показатели; в типизации определены рекомендуемые размеры (площадь ячейки) разведочной сети для категории  $C_1$ , которые связаны с вариабельностью содержаний и требованиями к точности их оценки;
6. Сформулированы предложения по расчету характеристик разведанности запасов и определению их категоричности в отдельных блоках.

**Личный вклад** состоит в обобщении и анализе большого объема данных по конкретным золоторудным объектам, в разработке подходов к оценке разведанности на основе количественных критериев, в определении их допустимых значений для запасов различных категорий, в выявлении роли количественных показателей сложности, в том числе фрактальной размерности  $D$ , в разработке алгоритмов определения рациональной плотности разведочной сети, особенно на ранних стадиях геологоразведочных работ, в создании типизации золоторудных объектов для целей разведки.

Проведенные лично автором расчеты и графические построения включают:

- расчеты статистических и геостатистических характеристик изучаемых объектов;
- анализ результатов сопоставления данных разведки и эксплуатации;
- расчеты по разрежению разведочной сети;

– изучение и определение фрактальной размерности для объектов разных морфологических типов;

– оценка ошибок геометризации эмпирическим методом, сравнение результатов с аналитическими данными.

Научные результаты, установленные в процессе проведения исследований, получены лично автором и являются оригинальными.

**Апробация работы:** основные результаты работы докладывались на Международных форумах Minex (2006 - 2016 гг.), Международном семинаре ГКЗ-КРИРСКО (2012 г.), Евразийской Конференции (Минск, 2016, 2018 гг.), Всероссийских семинарах ЦКР-ГКЗ, семинарах МинГео Сибирь (2010 - 2021 гг.), Первой Всероссийской научно-практической конференции Золото, «Полиметаллы XXI век» (Челябинск, 2019 г.). Материалы диссертации в виде тезисов докладов и презентаций представлялись на сайтах форумов, семинаров и конференций. Они излагались также на Геовebinарах (2021 - 2022 гг.).

**Публикации:** Основные положения изложены в 28 работах, опубликованных в рецензируемых журналах из перечня, рекомендованного ВАК Минобрнауки РФ. Сделано более 30 докладов на международных форумах и семинарах.

**Структура работы:** Диссертация объёмом 192 страниц машинописного текста состоит из введения, шести глав и заключения, содержит 94 иллюстраций, 33 таблицы и список литературы из 139 наименований.

#### **Благодарности:**

Автор испытывает чувство глубокого уважения к своим учителям: Каждану А.Б., Викентьеву В.А., Кашееву Л.П., памяти которых посвящается эта работа.

Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю ФГБУ «ВИМС», доктору геолого-минералогических наук Машковцеву Григорию Анатольевичу - вдохновителю выполнения данной работы, начальнику отдела МГЭОиРМ ФГБУ «ВИМС», кандидату геолого-минералогических наук Иванову Сергею Николаевичу и всему коллективу отдела. Хочу высказать своё уважение членам кафедры методики поисков и разведки МГРИ, многолетнее и плодотворное сотрудничество с которыми я ценю исключительно высоко. Приношу свою благодарность за понимание и поддержку моим друзьям и соратникам из различных организаций, занимающихся изучением и оценкой недр нашей страны.

# 1 ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ИЗУЧЕННОСТИ И КЛАССИФИКАЦИИ ЗАПАСОВ

## МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЁРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

### 1.1 Основные понятия и положения

Целью геологоразведочных работ является получение информации о свойствах полезного ископаемого, определяющих его промышленную ценность и возможность эффективной отработки месторождения. Полнота этой информации характеризуется степенью изученности объекта. Научную основу разведки и оценки составляет система знаний, обеспечивающих выбор оптимальной стратегии, методов и приемов сбора и обработки полученных данных. Оптимальность выбора методики и объемов работ регулируется, с одной стороны, минимизацией затрат на их проведение, а с другой стороны, рисками принятия неверных решений о вложении инвестиций и ошибками в составлении проекта освоения месторождения вследствие недостатка информации.

Возможность и эффективность освоения месторождения определяется его различными свойствами и характеристиками, которые в разведочной литературе называются факторами геолого-экономической оценки [13, 24, 30, 32, 33, 38, 42, 43, 44, 92]. Для получения информации по каждому из этих факторов используются разные методы исследований, не всегда взаимосвязанные между собой. Могут возникать ситуации, когда месторождения, хорошо изученные по одному фактору, оказываются не оцененными по другому свойству. Таким образом, изученность месторождения является комплексным понятием, требующим определения полноты информации по ряду свойств объекта.

При изучении месторождений следует выделить свойства, определяющие их промышленную значимость и требующие максимального внимания и затрат на проведение геологоразведочных работ. Наиболее важными для экономической оценки месторождения оказываются сведения о качестве и количестве руд, которые реализуются в запасах, изучение остальных свойств всегда увязывается с информацией о запасах.

В зависимости от области использования полезного ископаемого в качестве товарного продукта горных предприятий [90, 92] могут выступать:

- минеральное сырье (руда или горная масса), непосредственно добытое из недр в природном виде или после обработки, выполняемой на месте добычи;
- концентрат, полученный при обогащении добытого сырья и используемый как полуфабрикат для дальнейшей переработки в один или несколько товарных продуктов;

– металл, кристаллосырье или иной минеральный продукт, извлекаемый из добываемого сырья в товарном виде уже при первичной переработке.

Для месторождений, относящихся к двум последним группам, ведущими показателями, определяющими эффективность их освоения, являются содержание полезного компонента в рудах и их количество, эти характеристики можно определить термином «геологические свойства полезного ископаемого».

В число объектов, для которых геологические свойства имеют ведущее значение, входят месторождения черных, цветных и драгоценных металлов, урана, редких земель, алмазов и драгоценных камней, некоторых видов агрохимического сырья.

В дальнейшем в предлагаемой работе будут рассматриваться аспекты изучения и оценки золоторудных месторождений, хотя основные выводы и подходы могут быть применены ко всем указанным объектам.

Получение информации о геологических свойствах скоплений полезного ископаемого обеспечивается проведением геологоразведочных работ, которые требуют достаточно больших затрат средств и времени. Они выполняются путем создания в пределах перспективного минерализованного объема недр системы наблюдений или разведочной сети.

Детальность и полнота сведений о качестве и количестве полезного ископаемого зависит главным образом от количества наблюдений, свойств полезного ископаемого и особенностей их размещения в объеме месторождения. С этих позиций целесообразно отдельно рассматривать понятие «разведанность» запасов, которая зависит преимущественно от параметров разведочной сети и не связана с изучением других свойств месторождения: технологических, инженерно-геологических, экологических, гидрогеологических и т. д [13].

При характеристике результатов проведенных геологоразведочных работ обычно [31, 32, 34, 38, 43, 73, 81, 82] рассматриваются ошибки подсчета запасов, среди которых выделяют:

- 1) погрешности геологические (ошибки аналогии), связанные с распространением фактических данных по пересечениям на прилегающие объемы недр;
- 2) технические погрешности, связанные исполнением замеров свойств геологических объектов;
- 3) погрешности, связанные с применением различных методов подсчета.

Погрешности первой группы имеют объективный характер, их причиной является природная изменчивость свойств объекта, возможность познания которой определяется, прежде всего, количеством наблюдений и системой их расположения в пространстве изучаемого объекта. Этот тип ошибок (геологическая погрешность), по мнению большинства исследователей, является ведущим по значению. И.С. Васильев [5] отмечал, что «величина погрешности от распространения показателей отдельных разведочных выработок на весь



подсчитываемый объем является более значительной, чем предыдущие» (т.е. технические и методические погрешности – ПК). Инструкция ГГРУ Министерства геологии (1931 г.) [72] указывает на то, что геологическая погрешность «в большинстве случаев не поддается оценке и более всего отражается на точности приводимых цифр запасов».

Технические ошибки имеют субъективный характер и определяются приемами выполнения геологоразведочных работ. В их числе рассматриваются инструментальные ошибки измерений, аналитические ошибки определения содержаний компонентов, оценки объемной массы пород и руд, а также ошибки, связанные с недостатками в способах отбора проб, в выборе технических средств разведки и интерпретации результатов. Особое внимание традиционно обращается на качество опробования и аналитических работ, для которых разработана специальная система контроля.

Погрешности, связанные методикой подсчета запасов, включают в себя не только ошибки вычисления подсчетных параметров, но и ошибки, определяемые особенностями оконтуривания оруденения и применения кондиционных показателей [48, 54]. Различие подсчетов разными методами проявляется главным образом в объемах и запасах руды, средние содержания полезных компонентов при этом обычно рассчитываются сходным образом и практически совпадают. Как правило, расхождение общих цифр запасов при использовании разных подходов не превышает 5 %.

Ошибки всех типов по итоговому влиянию на конечные результаты подсчета делятся на случайные и систематические [13, 22, 41, 66, 76, 77]. Случайные ошибки единичных определений взаимно компенсируются при увеличении объема выборки, их математическое ожидание стремится к нулю. Систематические ошибки сохраняют свое влияние даже при повышении детальности исследований. Наиболее негативное воздействие на показатели освоения месторождений они имеют в случае завышения определяемых параметров относительно «истинных». В то же время существенное их занижение может привести к отрицательной геолого-экономической оценке объекта, представляющего в действительности промышленный интерес.

Методика проведения геологоразведочных работ в обязательном порядке включает определение уровня как случайных ошибок, так и систематических погрешностей в оценке параметров. Предельный/допустимый уровень случайных ошибок анализов регулируется методическими документами [66] с учетом вида минерального сырья и степени концентрации компонентов. Для других видов технических ошибок такие лимиты не установлены, хотя в практике работ подразумевается, что они находятся в тех же пределах.

Выявление систематических ошибок представляет собой отдельную, не всегда однозначно решаемую задачу. Наличие таких ошибок, в том числе связанных с неверной

методикой подсчета, приемов опробования, применения кондиций, а также с пониманием геологического строения объекта и т.д., можно установить только по результатам отработки [67]. В общем случае устранение влияния систематических ошибок достигается применением поправочных коэффициентов.

Таким образом, оценку степени разведанности запасов с позиций точности их подсчета, следует ориентировать на определение геологической погрешности. Это положение важно учитывать при проектировании геологоразведочных работ ранних стадий, когда технические и методические погрешности еще не проявились. Основной задачей этого этапа является выбор параметров сети, удовлетворяющих требованиям к запасам определенных категорий. После проведения работ возникает необходимость квалификации запасов, обусловленная принятием решений по текущей экономической оценке объекта. В этом случае при обсуждении вопросов, связанных с разведанностью запасов, можно условно полагать, что систематические ошибки разведки, в том числе опробования и аналитических работ отсутствуют, устранены с использованием поправок или не играют существенной роли.

Разведанность запасов определяется также надежностью геометризации рудных тел, которая непосредственно связана с параметрами разведочной сети.

Подход, основанный на выделении в рамках общей изученности геологического объекта аспектов, связанных только с их разведанностью, заложен в ряде зарубежных классификаций, в том числе в Кодексе публичной отчетности JORC (2012 г.) [96]. В соответствии с ним геологическая изученность скоплений полезного ископаемого характеризуется категориями measured, indicated и inferred, сами скопления полезного ископаемого относятся при этом к ресурсам (resources). Другие аспекты изученностей: технологической, горнотехнической, экономической и др., – относятся к «модифицирующим факторам», которые наряду с геологической изученностью, определяют отнесение минерального сырья к запасам (reserves) категорий proved и probable. Подобные же принципы заложены в Рамочную Классификацию ресурсов/запасов ООН.

## **1.2 Факторы, определяющие разведанность запасов**

Многолетняя практика ведения геологоразведочных работ и весь опыт отработки месторождений твердых полезных ископаемых показывает, что разведанность и квалификация запасов/ресурсов тесно связаны с природными характеристиками свойств объекта и с системой замеров этих свойств, то есть с методикой измерения/опробования, а также с параметрами разведочной сети (Рисунок 1.1).

Минерализованные участки недр, содержащие полезное ископаемое, обладают значительными размерами и недоступны для непосредственного воздействия, в связи с чем

основным способом изучения их природных свойств [31, 43] является метод выборочных наблюдений. Для формирования представлений об объекте далее используется метод моделирования. Размещение наблюдений в изучаемом объеме недр является одной из основных задач планирования и проведения геологоразведочных работ.



*Рисунок 1.1 – Схема соотношения факторов разведанности месторождений ТПИ*

В качестве свойств рудных образований (геологоразведочных параметров), определяющих квалификацию запасов и выбор геометрии разведочной сети, обычно рассматриваются: содержания полезных компонентов, мощность и продуктивность (метропроцент, метрограмм) рудных тел, площадь и объем залежей, морфологические характеристики рудных образований (размеры по падению и простиранию, коэффициент рудоносности, коэффициенты сложности и прерывистости, контурные модули). В совокупности эти свойства обычно характеризуются понятием «сложность геологического строения».

В зарубежных исследованиях [95, 97, 99] к ним добавляются геостатистические характеристики (пороговое значение вариограмм, зона влияния, размер поискового эллипсоида, дисперсия кригинга и др.). Многообразие показателей осложняет решение задачи объективной квалификации запасов.

Основным средством проведения наблюдений служат геологическая документация естественных и искусственных обнажений и выполнение замеров свойств объекта в пределах локальных объемов недр, то есть по пробам. Ведущим признаком оруденения, который в массовом порядке определяется в пробах, является содержание полезных компонентов. Другие характеристики месторождения, в том числе размеры рудных тел, их продуктивность и морфология, степень изменчивости признаков и другие, должны рассматриваться как производные по отношению к оценке содержаний. Мощности рудного тела определяются

кондициями и зависят от взаимного расположения проб с разными содержаниями по разведочному пересечению.

Каждая проба обладает геометрией, то есть размерами и ориентировкой в пространстве. Кроме того, предполагается, что она обладает определенной областью распространения по простиранию и падению рудного тела – зоной влияния. Рядом исследователей [31, 54, 74, 85]. отмечалось, что количественные характеристики изменчивости содержаний зависят от условий измерений, то есть от геометрии проб. В связи с этим в отечественной литературе такую изменчивость было предложено называть «наблюдаемой». В зарубежных публикациях действие фактора геометрии объекта измерений обозначается как «эффект основания» или «support-effect» [23, 35, 65, 95, 97].

Оптимальная стратегия изучения объекта предполагает равномерность размещения замеров в его объеме, при неравномерности размещения прирост информации становится непропорциональным понесенным затратам. В то же время решение ряда задач геолого-экономической оценки месторождения требует знания определенных характеристик, например, формы рудных тел и возможностей их селективной выемки, наличия обогащенных полезным ископаемым участков, их доли в общем балансе запасов и другое. Для решения такого рода задач создаются участки выборочного сгущения разведочной сети или участки детализации. Объем работ на таких участках зависит от конкретных условий объекта и стадии изучения.

Принципы изучения месторождений предполагают проведение геологоразведочных работ по стадиям, что позволяет оптимизировать затраты и свести к минимуму риски, связанные с оценкой и с освоением месторождения. Каждая из стадий нацелена на решение определенного ряда задач.

На стадии оценки проявлений полезного ископаемого основной задачей является определение экономической значимости объекта и необходимости его дальнейшего изучения; объем геологоразведочных работ в этом случае весьма ограничен. На стадии разведки решаются задачи, связанные с проектированием горнодобывающего предприятия и уточнением технико-экономических показателей освоения месторождения. Детальность изучения месторождения в этом случае увеличивается.

На стадии отработки геологоразведочные работы нацелены на планирование деятельности рудника в определенный период времени и на обеспечение его стабильной работы на весь срок эксплуатации. При этом решаются задачи увеличения минерально-сырьевой базы предприятия. Объем геологоразведочных работ на этой стадии является наиболее полным.

В соответствии со стадиями могут меняться представления об объекте, детальность его изучения как в целом, так и по отдельным участкам, в том числе подсчетных блоков.

Таким образом, условием изучения объектов является создание системы замеров – разведочной сети с определенными параметрами.

### **1.3 Требования к разведанности и квалификации запасов/ресурсов**

#### **1.3.1 Краткий исторический обзор**

Различие разведанности отдельных блоков, рудных тел и залежей реализуется в категориях запасов/ресурсов, которые являются важным инструментом регулирования необходимости и достаточности их изучения. Категории запасов/ресурсов зачастую определяют стоимостную оценку объекта.

Появление и развитие классификации запасов по степени разведанности произошло в начале XX века [87]. Циркуляр Лондонского института горного дела, опубликованный в 1902 г., применительно к термину «ore in sight» (руда в поле зрения), применявшемуся английскими горными инженерами, рекомендовал разделять руды на две категории:

- «руда оконтуренная», то есть обнаженная по крайней мере с трех сторон близко расположенными выработками;
- «руда пока не оконтуренная», существование которой можно предполагать с достаточным основанием.

В 1905 году после развернутой дискуссии, материалы которой были опубликованы в виде отдельного издания, Лондонским институтом горного дела и металлургии было предложено разделять запасы на три категории:

- «видимая руда» (visible ore) - подготовленная для добычи проведением всех необходимых горных выработок;
- «вероятная руда» (probable ore) - для извлечения которой проведена только часть необходимых горных выработок;
- «возможная руда» (possible ore) - руда, сведения о которой основаны на теоретических представлениях, но не заверены горными работами, такие запасы цифрами не выражались.

В 1909 году американским геологом Г. Гувером было предложено делить запасы на три категории в следующей формулировке:

- «доказанная руда» (proved ore) - для которой нет риска выклинивания или иного исчезновения;
- «вероятная руда» (probable ore) - для которой имеется некоторый риск исчезновения, но имеются убедительные доводы за ее существование;
- «предположительная руда» (prospective ore) – руда, которую нельзя включить в предыдущие классы и невозможно выразить цифрами.

Данная классификация была ориентирована на оценку геологических запасов. Термины, обозначающие две первые категории, до сих пор используются за рубежом, в том числе в шаблоне КРИРСКО.

На XI геологическом конгрессе (по железным рудам), проходившем в 1910 году в Стокгольме, для категорий запасов впервые были предложены буквенные обозначения:

- А – запасы, «для которых могут быть сделаны надежные вычисления их размеров, основанные на действительных исследованиях»;
- В – запасы, «для которых можно получить лишь весьма приближенное определение размеров»;
- С – запасы, размер которых «вовсе не может быть представлен в цифрах».

Первая отечественная классификация запасов была введена в 1927 году. В ней предлагалось принять буквенные обозначения запасов, однако при описании категорий был сделан акцент на их промышленное использование. Запасы категории А служили «для точных эксплуатационных расчетов предприятий» (А<sub>1</sub>) и «для производственных планов, как фонд, оправдывающий возврат капитальных и производственных затрат» (А<sub>2</sub>). Запасы категории В использовались «для планов предприятий и планирующих органов», а категории С – «для общегосударственных соображений, составления планов геологоразведочных работ и геологических выводов». Развитие принципов классификации запасов на этой основе отражено в Инструкции по подсчету запасов, 1931 г. [72]. В этом документе обращается внимание на необходимость количественной оценки разведанности.

В классификации 1937 года появилось разделение запасов категории В на В<sub>1</sub> и В<sub>2</sub>, а также категории С – на С<sub>1</sub> и С<sub>2</sub>. При дальнейшем развитии отечественной классификации запасов промышленное значение категорий постепенно размывалось, в настоящее время оно оказалось практически забытым.

На основе приведенного краткого обзора можно сделать выводы о том, что проблема оценки разведанности месторождений волновала геологов с самого начала становления данной отрасли производства. В разное время при характеристике категорий делались акценты на надежности оконтуривания, на учете аспектов деятельности предприятия и подготовленности запасов к выемке, на уверенности в цифрах самих запасов. Вместе с тем количественное определение требований к изученности объектов отсутствовало.

### **1.3.2 Требования к разведанности запасов в Российской Федерации**

В соответствии с Классификацией прогнозных ресурсов и запасов твердых полезных ископаемых (2006 г.) [37] предусматривается выделение по степени геологической изученности запасов категорий А, В, С<sub>1</sub> и С<sub>2</sub>.

При определении категорий характеризуется детальность изучения следующих классификационных признаков:

- формы, размеров и условий залегания тел полезного ископаемого, их внутреннего строения, изменчивости свойств полезного ископаемого, тектонических нарушений;
- природных разновидностей руд, технологических типов и сортов полезного ископаемого, их качества по всем предусмотренным промышленностью параметрам;
- минеральных форм нахождения полезных и вредных компонентов;
- контуров рудных тел и условий их проведения.

Запасы категории А выделяются на участках детализации разведываемых и разрабатываемых месторождений 1-й группы сложности геологического строения.

Запасы категории В выделяются на участках детализации разведываемых и разрабатываемых месторождений 1-й и 2-й групп сложности геологического строения.

Запасы категории С<sub>1</sub> составляют основную часть запасов разведываемых и разрабатываемых месторождений 1-й, 2-й и 3-й групп сложности геологического строения, а также могут выделяться на участках детализации месторождений 4-й группы сложности.

Запасы категории С<sub>2</sub> выделяются при разведке месторождений всех групп сложности, а на месторождениях 4-й группы сложности геологического строения составляют основную часть запасов, вовлекаемых в разработку.

В Классификации определены условия учета основных и попутных полезных компонентов.

Требования по детальности изучения каждого из классификационных признаков приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Классификация запасов твердых полезных ископаемых, ГКЗ

Классификационные признаки	Категории запасов			
	А	В	С <sub>1</sub>	С <sub>2</sub>
– форма, размеры и условия залегания тел п.и. – закономерности изменчивости морфологии и внутреннего строения – безрудные и некондиционные участки – разрывные нарушения	установлены и изучены полностью, выделены и оконтурены, установлены положение и амплитуды смещений	установлены основные особенности, определено пространственное положение, установлено положение крупных нарушений	выяснены основные особенности, оценена изменчивость и прерывистость, оценено наличие зон нарушений	оценены по геологическим, геофизическим и геохимическим данным, подтверждены ограниченным кол-вом горных выработок и скважин

Продолжение таблицы 1.1

Классификационные признаки	Категории запасов			
	А	В	С <sub>1</sub>	С <sub>2</sub>
природные разновидности, промышленные типы и сорта п.и., их состав, свойства качество по всем предусмотренным промышленностью параметрам	определены, выделены и оконтурены, охарактеризовано	определены, выделены и при возможности оконтурены охарактеризовано	определены, установлены общие закономерности и размещения, количественные соотношения типов, охарактеризовано	
минеральные формы нахождения полезных и вредных компонентов	изучены распределение и формы нахождения в минералах, продуктах переработки и переделов	определены	определены	
контур рудных тел и условия его проведения	определен по данным детального опробования горных выработок и скважин	определен по результатам опробования скважин и горных выработок	определен по результатам опробования скважин и горных выработок с учетом геофизических и геохимических данных	определен на основании опробования единичных скважин, горных выработок и естественных обнажений с учетом геологических построений, геофизических и геохимических данных

На разрабатываемых месторождениях вскрытые, подготовленные и готовые к выемке, а также находящиеся в охранных целиках горно-капитальных и горно-подготовительных выработок запасы полезных ископаемых подсчитываются отдельно с подразделением по группам и категориям в соответствии со степенью их геологической изученности.

Отмечено [37, 40, 66], что при квалификации запасов полезных ископаемых по категориям в качестве дополнительного классификационного показателя должны использоваться количественные и вероятностные оценки точности и достоверности определения основных подсчетных параметров. Это положение не подкреплялось далее конкретными рекомендациями по определению величины критериев для разных категорий запасов и условий их вычисления.

В Классификации [37] предусмотрено разделение запасов по экономическому значению на балансовые и забалансовые. К балансовым относятся запасы, для которых технико-экономическими расчетами доказана экономическая эффективность отработки при современном



уровне развития техники и технологии разработки с учетом требований по рациональному использованию недр и охране природы. К забалансовым относятся запасы, отработка которых в современных условиях нецелесообразна по различным причинам, в то же время существуют экономические, технологические, горнотехнические и другие предпосылки использования их в ближайшей перспективе, доказана возможность их извлечения и сохранения для дальнейшего использования.

В представленных формулировках требований к изученности запасов основное внимание уделяется выделению и оконтуриванию (геометризации) рудных образований, включая собственно рудные тела и разделяющие их безрудные прослои, разрывные нарушения, а также технологические типы и сорта руд. Категории запасов различаются главным образом детальностью такого выделения. Аналогичным образом различается детальность выявления закономерностей в изменении геологоразведочных параметров, хотя степень их изменчивости прямо не указана.

В целом, можно отметить, что предложенные формулировки требований имеют качественный характер, что допускает разночтения в их трактовке.

Соотношение запасов разных категорий по стадиям работ и типам месторождений в Классификации формально не лимитируется; отмечено, что оно определяется по усмотрению недропользователя. Для обоснования параметров кондиций предполагается использование запасов категории  $C_2$  в полном объеме, вовлечение их в проект отработки определяется рекомендациями экспертизы. По сложившимся правилам представления материалов ТЭО кондиций и подсчета запасов в ГКЗ РФ, по результатам разведки золоторудных месторождений необходимо, чтобы запасы категории  $C_2$  не превышали 50 % от их общего количества. Такое положение в сочетании с отсутствием количественных требований к квалификации запасов для категорий не позволяет оценивать величину ошибок в определении параметров запасов и связанные с такими ошибками экономические риски освоения месторождений.

Существующая Классификация запасов и требования к ним во многом наследует понятия и подходы, установленные во времена плановой экономики, когда государство являлось и недропользователем, и собственником недр. Это обстоятельство предполагало возможность выбора наиболее перспективных объектов из их множества для дальнейших исследований или отработки. С учетом требований к необходимым соотношениям запасов, а также при ограничении в использовании запасов категории  $C_2$  для проектирования экономические риски освоения сводились к минимуму.

В современных условиях роль экономических критериев существенно возрастает, что ориентирует на создание более совершенных инструментов оценки инвестиционной привлекательности геологических объектов. Корректировка требований к разведанности запасов

необходима еще и в связи с тем, что существует потребность во взаимодействии с мировой практикой оценки месторождений и нахождении путей гармонизации отчетности в различных стандартах.

### 1.3.3 Классификация запасов в шаблоне КРИПСКО

Ведущие страны-производители минерального сырья в настоящее время входят в организацию КРИПСКО (Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards), основанную в 1994 году с целью взаимного согласования национальных стандартов публичной отчетности. В КРИПСКО со своими Кодексами отчетности участвуют такие страны, как Австралия (JORC), ЮАР (SAMREC), государства ЕС и Великобритания (PERC), Чили (IMCh), Канада (CIM, NI-43-101) и ряд других стран. Россия является членом КРИПСКО с 2012 года.

Основные положения классификации запасов/ресурсов, имеющиеся в шаблоне публичной отчетности, соответствуют Австралийскому Кодексу JORC [96]. В графическом виде взаимоотношения категорий и влияющие на них факторы представлены на рисунке 1.2.

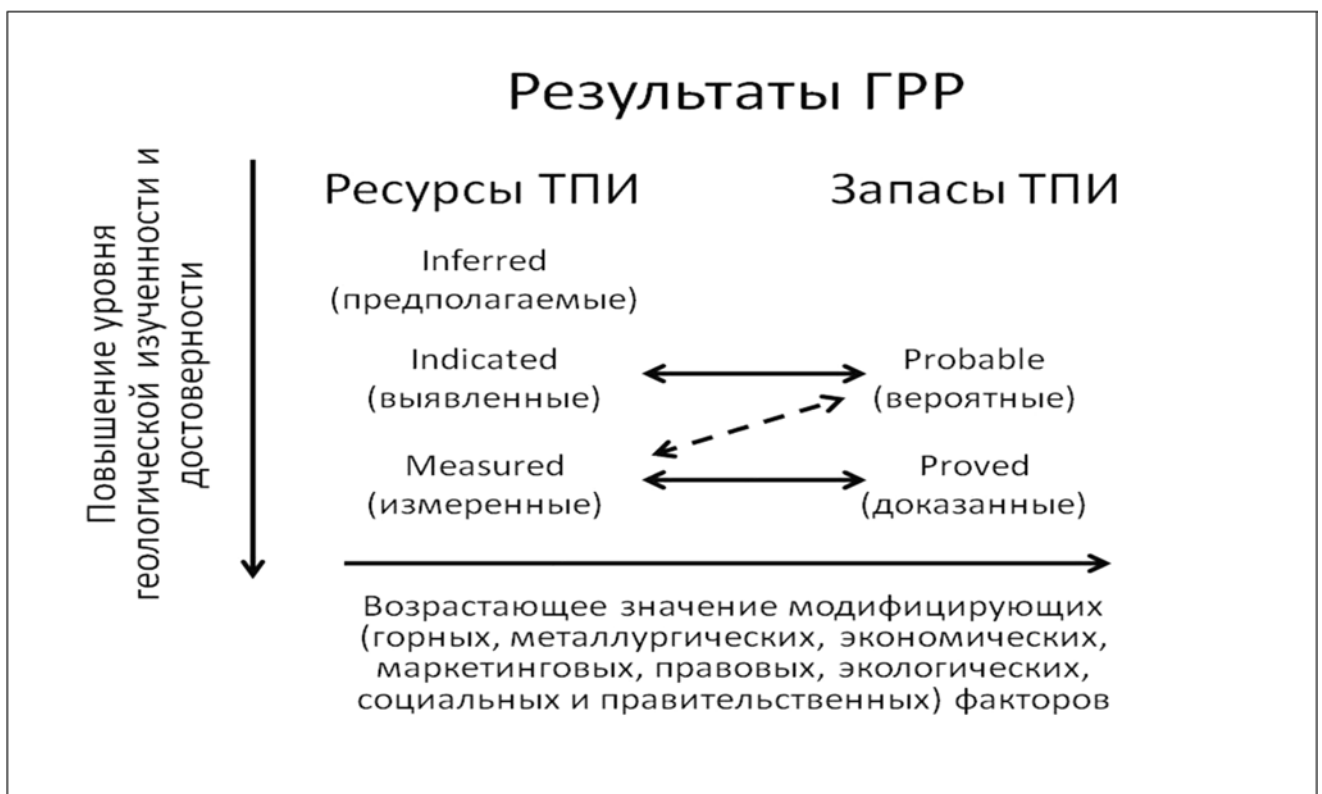


Рисунок 1.2 – Схема классификации запасов/ресурсов в Кодексе JORC

Требования к ресурсам по JORC включают следующие положения:

1) «Минеральные ресурсы» – концентрация или залегание представляющего экономический интерес твердого полезного ископаемого в такой форме, с таким содержанием полезного компонента (или такого качества) и в таком количестве, что существуют разумные перспективы его полного экономически эффективного извлечения.

В порядке достоверности геологических данных Минеральные ресурсы подразделяются на Предполагаемые (inferred), Указанные (indicated) и Измеренные (measured).

Минеральные ресурсы категорий indicated и measured переводятся в запасы (reserves) с учетом «модифицирующих факторов» – ограничений, включающих горные, перерабатывающие, металлургические, инфраструктурные, экономические, маркетинговые, правовые, экологические, социальные и государственные факторы.

2) «Предполагаемые минеральные ресурсы» - та часть ресурсов, для которой количество материала и содержание полезного компонента (или качество) оцениваются на основе ограниченных геологических данных и пробоотбора. Геологических данных должно быть достаточно для того, чтобы предположить геологическую непрерывность и непрерывность содержаний полезного компонента (качества).

3) «Указанные минеральные ресурсы» – та часть минеральных ресурсов, для которой количество материала и содержание полезного компонента (качество), плотность, форма и физические характеристики оцениваются с достоверностью, достаточной для довольно подробного рассмотрения модифицирующих факторов и оценки экономической эффективности отработки месторождения.

4) «Измеренные минеральные ресурсы» – та часть минеральных ресурсов, для которой количество материала и содержание полезного компонента (или качество), плотность, форма и физические характеристики оцениваются с достоверностью, достаточной для использования модифицирующих факторов для дальнейшего планирования горных работ и окончательной оценки экономической эффективности отработки месторождения.

Из приведенного перечня требований к квалификации ресурсов (запасов) следует, что одним из основных квалификационных признаков является достоверность оценки количества и качества полезного ископаемого. С позиций количественного подхода к определению достоверности она может характеризоваться случайной погрешностью определения среднего значения того или иного параметра. Это положение постоянно используется в работах зарубежных исследователей [95, 97-100].

В качестве другого квалификационного признака предлагается использовать понятие непрерывность (continuity), которое рассматривается как «геологическая непрерывность и непрерывность содержаний». Можно заключить, что требование непрерывности предполагает, что между пересечениями, включенными в контур рудного тела, не должны существовать перерывы в его сплошности. По сущности непрерывность оруденения (выдержанность, протяженность в отечественной терминологии) определяет надежность увязки рудных тел при данной геометрии разведочной сети. В отечественных подходах она связывается с размерами

рудных тел по определенным направлениям и количественно характеризуется через ошибки геометризации.

Зарубежными специалистами, работающим по стандартам, входящим в шаблон КРИРСКО [1, 99, 101-139], непрерывность оруденения, как правило, оценивается по вариограммам. В обычной практике геостатистического анализа рассматриваются вариограммы содержаний. Вариограммы индикатора, которые, собственно, характеризуют форму рудных тел, в публичных отчетах принимаются во внимание в относительно редких случаях. Вместе с тем в Кодексе существует указание: *При оценке геологической непрерывности и непрерывности содержаний полезного компонента в целях классификации ресурсов Компетентное лицо должно учитывать тип минерализации и бортовое содержание.*

На основе анализа требований к категориям ресурсов и запасов в зарубежных стандартах можно заключить, что они базируются на характеристиках изменчивости содержаний и геометрических показателях оруденения.

В осуществлении программ по изучению месторождений за рубежом так же, как и в РФ, существует определенная стадийность, вызванная необходимостью оценки и отбраковки объектов по результатам предыдущих работ и определением методики их изучения на следующих стадиях. Приблизительно стадия оценочных работ в РФ соответствует pre-feasibility study, а стадии разведки и подготовки проекта отработки – feasibility study. В последнем случае проводится полноценная горнотехническая, технологическая, экономическая оценка объекта, при которой рассматриваются все аспекты его освоения, включая инженерно-геологические, гидрогеологические, экологические, социальные и другие вопросы. При проведении этих исследований в расчетах учитываются только минеральные ресурсы категорий indicated и measured, которые частично или в полном объеме переходят в разряд запасов категорий probable и proved, соответственно. Минеральные ресурсы категории inferred, частично сопоставимые с российскими запасами категории С<sub>2</sub>, в геолого-экономической оценке объекта не принимают участия.

Запасы категорий probable и proved соответствуют по статусу эксплуатационным (извлекаемым) запасам в российской терминологии, при их оценке учитываются возможные потери и разубоживание. Фиксированные соотношения между этими запасами формально не устанавливаются, однако практика рассмотрения публичной отчетности показывает, что запасы категории proved соответствует 3 - 5 годовым производительностям предприятия, на их основе решаются задачи перспективного планирования отработки.

### **1.3.4 Сопоставление принципов оценки и классификации запасов/ресурсов в России и по шаблону КРИРСКО**

Для определения подходов к гармонизации отечественных и зарубежных стандартов отчетности необходимо провести их сопоставление по основным положениям, а также по терминологическим аспектам.

В сопоставляемых стандартах различаются, прежде всего, понятия «запасы» и «минеральные ресурсы». Термин «запасы» в рассматриваемых классификациях относится к скоплениям полезного ископаемого, относительно которых проведена геолого-экономическая оценка. По российским правилам недропользования она проводится, начиная со стадии оценочных работ, когда по ее результатам устанавливаются временные кондиции. С этих позиций применение термина «запасы» вместо термина «минеральные ресурсы» оправдано, хотя надежность определения экономических показателей на ранних стадиях ГРП является относительно низкой.

Правила недропользования за рубежом не предусматривают процедуру государственного утверждения кондиций и учета запасов. В связи с этим оценка минеральных ресурсов в отчетах дается, как правило, по вариантам кондиций, среди которых для золоторудных месторождений основную роль для оконтуривания играет уровень «cut-off grade» - предельное содержание в ячейке блочной модели. На обрабатываемых месторождениях переоценка запасов и величины «cut-off grade» проводится на регулярной основе (не реже одного раза в год) с учетом сложившейся экономической конъюнктуры.

Оконтуривание запасов в рамках российских подходов производится в геологических границах, а в случае их отсутствия – по данным опробования на основе установленных кондиций, включающих бортовое содержание полезного компонента, а также требования к минимальной мощности рудного тела и максимальной мощности прослоев пустых пород и некондиционных руд.

По представлениям отечественных и зарубежных специалистов минеральные ресурсы категории *measured* соответствуют категории A+B, категория *indicated* практически полностью согласуется с категорией C<sub>1</sub>, частично – с категорией C<sub>2</sub>. Минеральные ресурсы категория *inferred* рассматривается как эквивалент категории C<sub>2</sub> и частично – категории P<sub>1</sub>.

В сводном виде сравнение основных принципов и подходов к классификации запасов/ресурсов в России и по шаблону КРИРСКО приведено в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнение принципов классификации запасов в России и по шаблону КРИРКСКО

№	Российская классификация	Стандарты отчетности шаблона КРИРКСКО
1	Категорийность запасов определяется геологической, горнотехнической и технологической изученностью.	Геологическая изученность минеральных ресурсов (mineral resources) рассматривается отдельно от горнотехнической, технологической и экономической оценки.
2	Запасы оцениваются в недрах, без учета потерь и разубоживания.	Для рудных запасов (ore reserves) допускается оценка извлекаемых запасов, т.е. с учетом потерь и разубоживания.
3	Запасы оконтуриваются и подсчитываются на основе экономически обоснованных кондиций, утверждаемых в государственных органах по недропользованию.	Оценка минеральных ресурсов (mineral resources) может проводиться в границах, не имеющих экономического обоснования.
4	При обосновании кондиций и проектировании предприятия допускается учет запасов категории C <sub>2</sub>	Ресурсы, соответствующие категории C <sub>2</sub> (inferred), не участвуют в геолого-экономической оценке объекта и в обосновании инвестиций.
5	Балансовая принадлежность запасов определяется на относительно длительный срок; изменение кондиций требует проведения государственной экспертизы.	Экономическая переоценка запасов может проводиться периодически при любом изменении конъюнктуры рынка и технических возможностей освоения объекта.
6	Достоверность сведений о качестве и количестве запасов, об их экономической значимости, о горнотехнических, технологических и других условиях оценивается государственной экспертизой на основе заключений независимых экспертов.	Оценка качества и полноты исходной информации, а также результатов оценки запасов и их экономической значимости возлагается на Компетентное Лицо или группу Лиц (экспертная компания).
7	При оценке потенциала месторождений учитываются забалансовые запасы.	Категорий, соответствующих забалансовым запасам/ресурсам, нет.
8	Месторождения по степени изученности разделяются на разведанные и оцененные.	Эквивалент понятия «оцененные месторождения» отсутствует.
9	Проекты отработки составляются на основе запасов, утвержденных по постоянным кондициям	Для обоснования инвестиций и составления проекта освоения месторождения требуются запасы категорий proved (A+B) и probable (C <sub>1</sub> )
10	Осуществляется ежегодный учет погашенных запасов; сопоставление результатов разведки и разработки является обязательным элементом контроля за качеством добычных работ.	Государственные органы не участвуют в контроле за полнотой и качеством отработки. Ежегодная отчетность о ресурсах и запасах объектов является прерогативой недропользователей.

По результатам проведенного обзора требований к классификации запасов/ресурсов в российских и международных стандартах можно сделать следующие выводы:

- российские и международные условия недропользования базируются на разных принципах и подходах, используется различная терминология;
- классификации используют сходные показатели изученности, основными из которых являются: достоверность оценки параметров запасов/ресурсов и надежность оконтуривания или геометризации оруденения;

– характеристика разведанности для категорий запасов/ресурсов имеет преимущественно качественный характер – количественные показатели или критерии разведанности как в зарубежных, так и в российских стандартах отчетности однозначно пока не установлены.

Положения представленной работы позволяют в определенной мере преодолеть данные противоречия и найти единообразные способы оценки разведанности запасов в тех и других стандартах.

Пример оценки разведанности запасов/ресурсов по отечественным и зарубежным подходам будет рассмотрен более подробно в главе 6.

## **2 СВОЙСТВА РУДНЫХ ОБЪЕКТОВ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ИЗУЧЕНИЯ**

Основными свойствами скоплений твердых полезных ископаемых, определяющими их разведанность, являются морфология рудных образований и изменчивость геологоразведочных параметров. Среди методов, использующихся для их описания, наибольший интерес представляют подходы, позволяющие давать им количественные характеристики, которые непосредственно влияют на оценку сложности геологического строения объектов, определение параметров разведочной сети и квалификацию запасов.

Рассматриваемые методы в определенной степени являются традиционными, однако в их использовании сделан акцент на показателях и положениях, которым не всегда уделялось достаточного внимания с позиций решения поставленных задач. Особый интерес представляет характеристика методов фрактальной геометрии, которые ранее практически не применялись в данной области исследований.

### **2.1 Изучение морфологии рудных образований**

#### **2.1.1 Общие положения**

Морфология рудоносных образований является одним из ключевых понятий в теории и практике ведения геологоразведочных и добычных работ. Морфологические классы (типы) положены в основу характеристики промышленных типов золоторудных месторождений, представленной в Методических рекомендациях ГКЗ (Золото рудное, 2007) [66]. На основе морфологических характеристик оруденения создана группировка месторождений по сложности геологического строения [37, 43, 66], которая играет важную роль в выборе параметров разведочной сети и обосновании квалификации запасов.

Рудные объекты характеризуются разнообразием слагающих их элементов, различающихся масштабом их проявления и значением с позиций оценки сложности строения месторождения. Для устранения разночтений в трактовке тех или иных понятий при их описании предлагается пользоваться системным подходом к характеристике рудоносных образований, предложенным А.Б. Кажданом [31, 32]. В соответствии с ним в строении минерализованных участков недр рассматриваются объекты разных размеров или разных масштабных/структурных уровней. В их числе было предложено выделять: месторождения в целом, минерализованные зоны, рудные залежи, рудные тела, обособленные участки.

Возможности характеристики образований каждого из уровней определяются разведанностью объекта. Месторождения и минерализованные зоны являются объектами изучения на ранних стадиях геологоразведочных работ – при поисках и оценке. Месторождения представляются как сочетание минерализованных зон, в составе которых в свою очередь могут



быть выделены рудные залежи. Последние рассматриваются как совокупность рудных тел и разделяющих их прослоев пустых пород и некондиционных руд. Как правило, на золоторудных объектах они выделяются на стадии разведочных или добычных работ.

Рудные тела являются объектами селективной выемки, их оконтуривание в объеме недр производится по установленным кондиционным показателям при достаточной плотности сети наблюдений. Обособленные участки в их пределах: рудные столбы, пережимы, гнезда, – могут быть особым объектом внимания при ведении эксплуатационных работ.

На основе анализа подходов к характеристике морфологии рудных объектов, представленных в методических документах, можно заключить, что в них одновременно дается описание элементов разных структурных уровней. С одной стороны, такой подход оправдан необходимостью дать обобщенные сведения об объекте, что особенно важно для ранних стадий геологоразведочных работ (ГРР). С другой стороны, такое смешение понятий недостаточно четко ориентирует на объекты описания морфологических свойств и возможности применения к ним количественных показателей сложности.

### **2.1.2 Принципы описания морфологии рудных объектов**

Общим правилом деления геометрических фигур по форме является их характеристика по соотношению основных размеров в 3D-пространстве [80]. С этих позиций можно говорить об округленных, плоских и удлинённых классах объектов. Первые имеют примерно равные размеры по всем направлениям и могут считаться изотропными. Среди рудных объектов к ним относятся штокверки.

Вторые характеризуются резко уменьшенным размером по одному из направлений (по мощности) и относительно близкими по другим ортогональным направлениям – по длине и ширине. Соотношение длины и ширины объектов количественно характеризуется коэффициентом анизотропии (удлинения). При небольшом удлинении и повышенной мощности тела описываются как линзы и гнезда. Линия пересечения плоскости рудного тела с горизонтальной плоскостью характеризует простирание, а с вертикальной плоскостью – падение. Ориентировка длинной оси тела относительно горизонта определяет склонение. Из месторождений к ним относятся пласты, жилы, минерализованные зоны.

В случаях, когда длина на порядок или на несколько порядков превышает ширину можно говорить о лентообразной разновидности плоских тел. В геологии к ним относятся россыпи, неглубокие линейные и площадные коры выветривания, рудные столбы в плоскости рудных тел.

Объекты третьего класса – удлинённые, характеризуются резким преобладанием длины над остальными размерами. Ориентировка длинной оси тела относительно горизонта определяет склонение. Основными морфологическими характеристиками являются длина по склонению и

площадь поперечного сечения с учетом ее изменения вдоль длинной оси. Среди геологических объектов к этому классу относятся трубообразные тела и штоки.

В соответствии с системным подходом и принятой в методических документах типизацией [37, 66] целесообразно отдельно характеризовать объекты низких и более высоких уровней строения месторождений. К первым относятся минерализованные зоны и залежи, ко вторым – рудные тела.

Для первых объектов характерна возможность выделения и описания по совокупности геологических признаков, достаточно уверенно определяемых на ранних стадиях изучения месторождения. Корректность проведения их внешних границ не оказывает существенного влияния на методику ГРП, важной является только оценка общих размеров, определяющая масштабы месторождения. Условия залегания таких объектов определяется достаточно просто по ограниченному количеству пересечений.

Образования более высокого структурного уровня – рудные тела – выделяются, как правило, с использованием кондиционных показателей, в связи с чем их границы могут меняться на одном и том же объекте в зависимости от условий оконтуривания. Форма рудных тел чаще всего является сложной и в полной мере устанавливается только в процессе ведения добычных работ.

При описании объектов разных структурных уровней важно использовать количественные характеристики их морфологии, на основе которых возможно создание их типизации для целей разведки.

### **2.1.3 Характеристика объектов низких масштабных уровней**

Признаками, характеризующими объекты низких структурных уровней, следует считать размеры образований по различным направлениям и их соотношение. Размеры образований в целом определяют масштаб объекта, а их соотношения в сочетании с дополнительными свойствами характеризуют морфологический тип оруденения.

Масштаб объекта является важной характеристикой оценки месторождения, он же определяет возможную производительность предприятия и связанные с ней показатели себестоимости добычи и обогащения руд. Эта характеристика также может быть определена на ранних стадиях ГРП. Существенные ошибки в сторону занижения масштаба являются нежелательными, однако не критичными, особенно в том случае, когда геолого-экономическая оценка объекта остается положительной.

По общим размерам золоторудные месторождения традиционно делятся на уникальные, крупные, средние и мелкие. В литературных источниках [14, 31, 32, 37, 38, 43, 73] чаще всего рассматривается деление по запасам самого полезного компонента, то есть по запасам золота. В

то же время для целей выбора параметров сети и планирования геологоразведочных работ более важным является деление объектов по объемам изучаемых участков недр, то есть по запасам руды. Граничные значения для этого показателя пока однозначно не определены. На основе анализа фактических данных по классификации объектов предварительно можно принять, что уникальные по масштабу золоторудные объекты характеризуются запасами руды более 250 млн т, крупные – от 50 до 250 млн т, средние – от 10 до 50 млн т, мелкие – менее 10 млн т. Следует иметь в виду, что для объектов, представляющих промышленный интерес, в целом отмечается тенденция снижения средних содержаний золота при увеличении масштаба. В связи с этим различие запасов золота по выделенным группам проявляется менее контрастно.

Морфологические классы (типы) положены в основу характеристики промышленных типов золоторудных месторождений, представленной в Методических рекомендациях ГКЗ (золото рудное, 2007) [66]. Основными характеристиками, определяющими принадлежность объекта к морфологическому типу, являются:

- соотношение размеров рудных тел по разным (ортогональным) направлениям;
- ориентировка длины, ширины и мощности тел и ее устойчивость в пространстве;
- изменчивость (выдержанность или прерывистость) характеристик по разным направлениям, включая тектоническую и пликативную нарушенность;
- особенности минерального состава и распределения полезного компонента в объеме тел и залежей.

В соответствии с существующими нормативно-методическими документами и публикациями [14, 39, 66] для золоторудных месторождений выделяются: штокверковый (мегаштокверковый), жильно-прожилковый (минерализованных зон) и жильный типы, различающиеся по минеральному составу и формационной принадлежности. Дополнительно по морфологическим особенностям, условиям залегания и внутреннему строению рудных тел, а также по характеру распределения золота классы подразделяются на типы, включающие: штокверки, минерализованные и жильные зоны, жилы, залежи сплошных и вкрапленных руд, трубообразные и неправильной формы залежи и гнезда. К отдельным типам отнесены «оруденелые» дайки и экзогенные месторождения – коры выветривания и россыпи.

Штокверки представляют собой совокупность различно ориентированных, неравномерно распределенных маломощных жил и прожилков, сопровождаемых вкрапленной сульфидной минерализацией. Типичные штокверки имеют сопоставимые размеры по всем направлениям (Рисунок 2.1). В ряде случаев штокверками (линейными штокверками) называют объекты, имеющие одно преобладающее направление рудоконтролирующих структур при подчиненной роли других. Участки с промышленными рудами в штокверках характеризуются отсутствием четких геологических границ, они определяются по данным опробования.

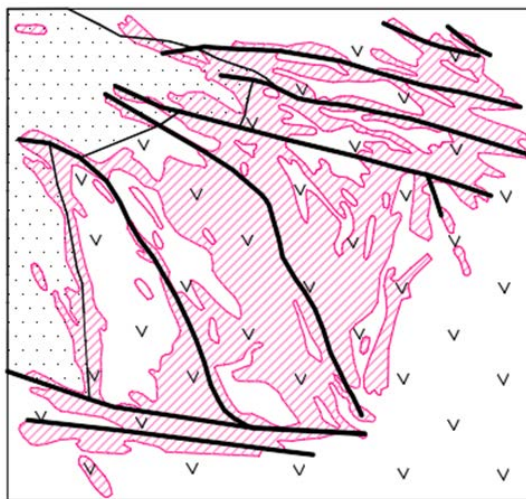


Рисунок 2.1 – Морфология оруденения в пределах штокверковского месторождения, план горизонта. (по Шумилину М.В. и др. из кн. Экспертиза запасов рудных месторождений [12])

Минерализованные зоны приурочены к участкам тектонически нарушенных гидротермально-измененных пород. Оруденение локализуется преимущественно в виде прожилково- жильных и прожилково-вкрапленных образований. Для них характерны относительно большие размеры по падению и простиранию, значительная мощность (от 5 - 10 до 50 и более метров), устойчивость залегания (Рисунок 2.2). Промышленное оруденение (рудные тела) обычно не имеет четких геологических границ – его оконтуривание выполняется по данным опробования на основе установленных кондиций.

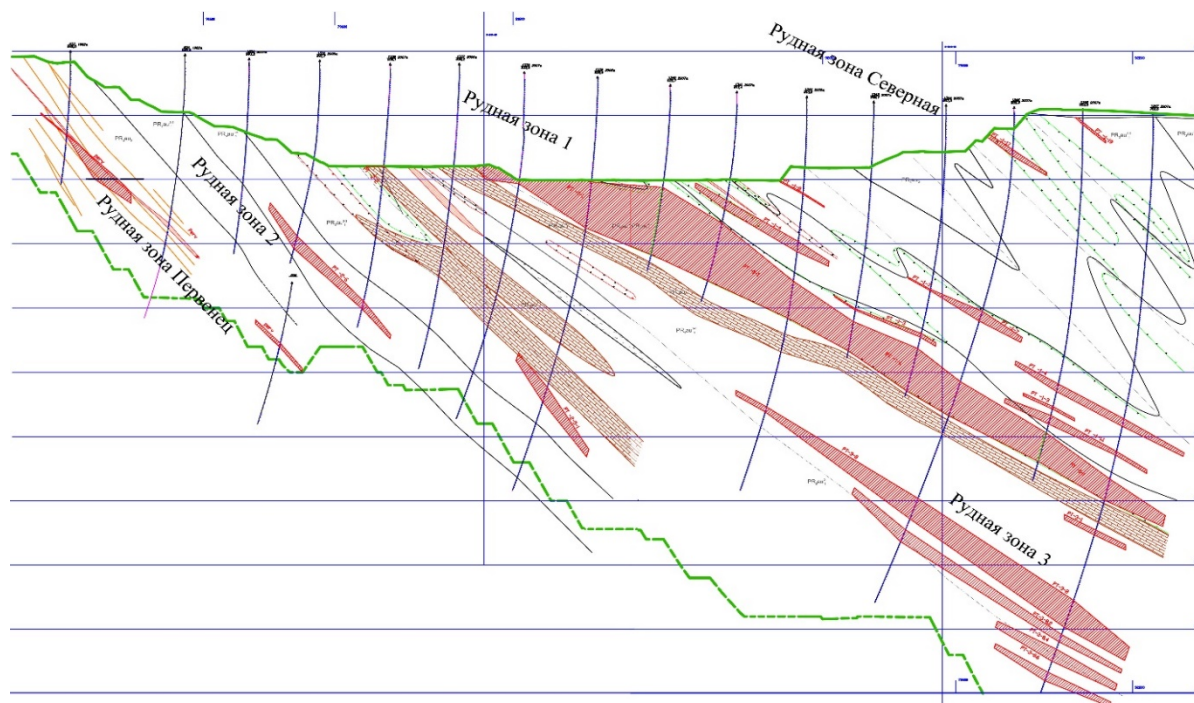


Рисунок 2.2 – Распределение оруденения в пределах минерализованной зоны (разрез по месторождению Вернинское; красным – рудные зоны, коричневым – маркирующие тела известняков)

Жильные месторождения могут быть представлены одной или серией разобщенных жил различной протяженности (от десятков метров до 1 км и более), их локализация контролируется разрывными нарушениями. Мощность жил меняется от первых десятков сантиметров до 5 м, редко более метров. По мощности они имеют четкие геологические границы, однако по падению и простираию степень их золотоносности может значительно различаться (Рисунок 2.3).

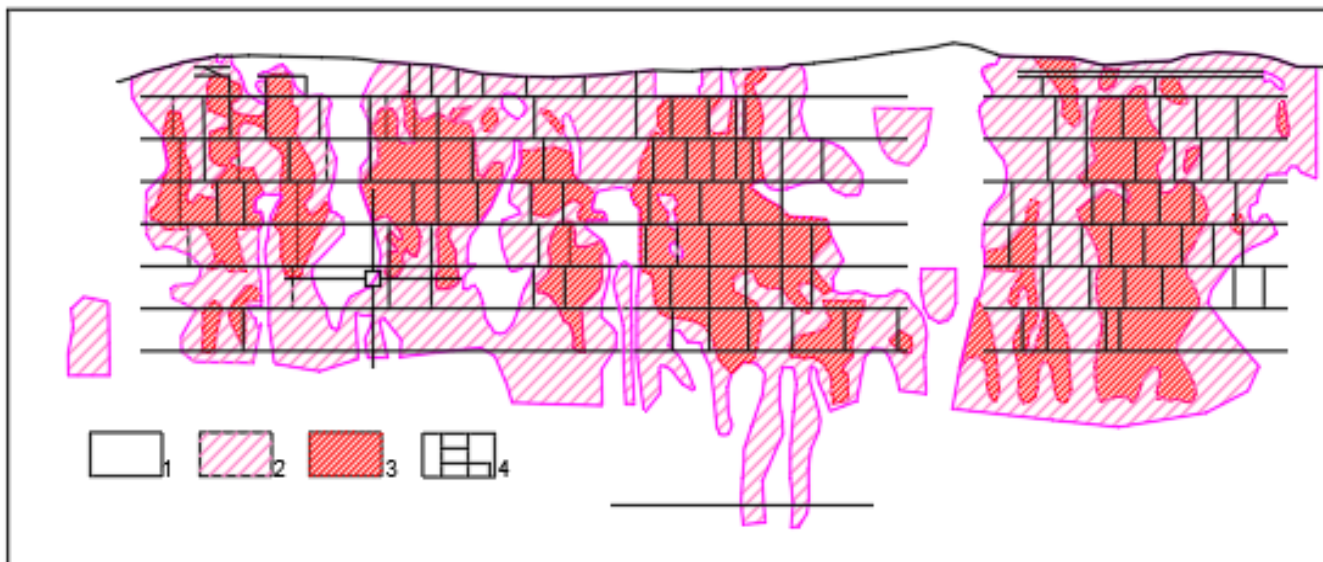


Рисунок 2.3 – Распределение оруденения на проекции жилы (по Г.П. Воларовичу и др. из кн. *Методика разведки золоторудных месторождений* [14])

1 – безрудные участки, 2 – рядовое оруденение, 3 – рудные столбы, 4 – горные выработки

При оконтуривании жил по кондициям (минимальное содержание на пересечение) в их плоскости могут выделяться «безрудные» краевые части или внутренние «окна». Кроме того, в пределах жил по повышенному метрограмму или содержаниям и мощности фиксируются «рудные» столбы, представляющие наибольший промышленный интерес.

К этому же типу месторождений условно могут быть отнесены и «оруденелые дайки», которые представляют собой «плоские» тела с неравномерным распределением полезной минерализации в плоскости объекта.

Залежи представляют собой образования с неустойчивым залеганием, переменной мощностью и с различной ориентировкой главных осей в объеме месторождения. В большинстве случаев они формируются в результате метасоматических процессов, ход которых определяется различными факторами: разрывными нарушениями, составом, физико-механическими свойствами пород и характером их контактов (Рисунок 2.4).

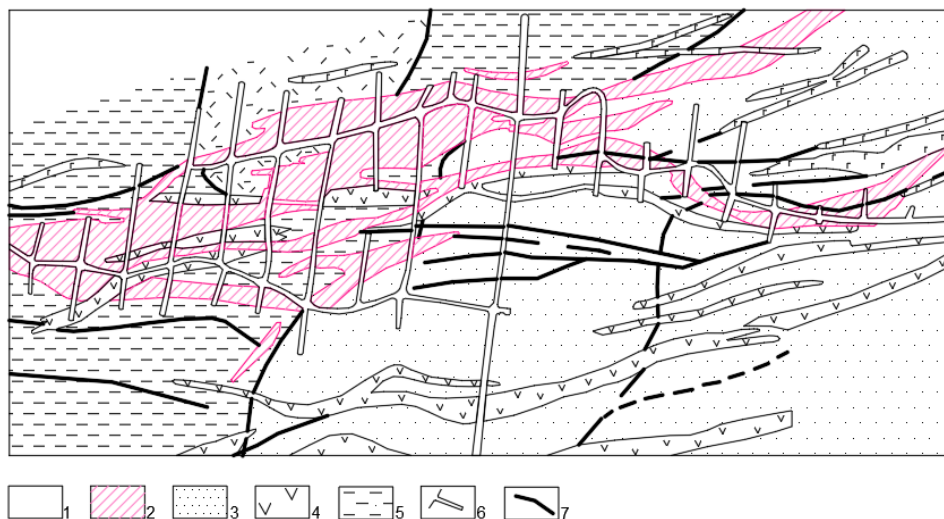


Рисунок 2.4 – Рудная залежь в вулканогенно-осадочных породах (месторождение Многовершинное) (по Г.П. Воляровичу и др. из кн. Методика разведки золоторудных месторождений [14])

1 – нет данных, 2 – рудная залежь, 3 – вулканы кислого состава, 4 – дайки кварцевых порфиров, 5 – туфогенно-осадочные породы, 6 – горные выработки, 7 – разрывные нарушения.

Рудные тела в пределах залежей не имеют четких геологических границ и выделяются по кондиционным показателям. В них часто отмечается зональное распределение (строение), выражающееся в снижении концентраций полезного ископаемого к краевым частям образований. При неустойчивых элементах залегания они иногда характеризуются как «залежи неправильной формы». В качестве разновидности выделяются пластообразные и линзообразные залежи. Они типичны для кор выветривания, а также россыпных месторождений.

Трубообразные тела и штоки (Рисунок 2.5) имеют ограниченное распространение и, как правило, встречаются на месторождениях совместно с другими морфологическими типами (Рябиновое, Кочбулак, Албын).

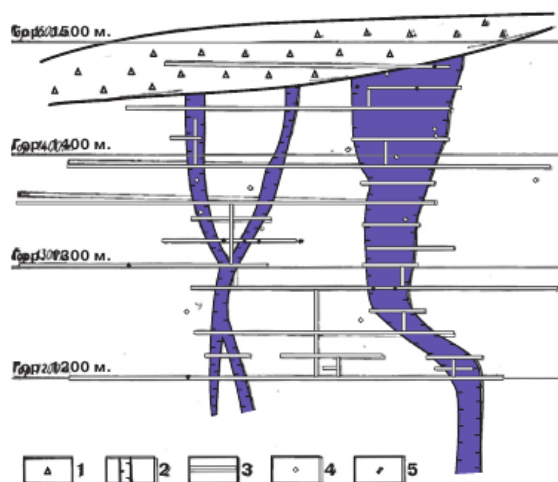


Рисунок 2.5 – Богатые трубообразные тела в плоскости крутопадающего жильного тела (по материалам Г.П. Воляровича и др.)

1 – рыхлые отложения, 2 – трубообразные тела, 3 – горные выработки, 4 – скважины рудные, 5 – скважины безрудные



Описанные морфологические типы могут встречаться совместно в пределах конкретных рудных полей и месторождений, однако определяющую роль, как правило, играет один из них.

Для типизации золоторудных месторождений, как отмечалось выше, важное значение имеет их масштаб, который в определенной мере согласуется с морфологическими типами. Уникальные и крупные месторождения, как правило, относятся к штокверкам и минерализованным зонам. Средние по масштабу объекты характерны для всех морфологических типов, за исключением трубообразных образований и штоков. Среди мелких объектов преобладают месторождения жильного типа.

Примеры золоторудных месторождений (включая страны СНГ) с характеристикой их морфологических типов и масштаба приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Морфологические типы и размеры месторождений

Морфологический тип	Размер месторождения			
	Уникальные	Крупные	Средние	Мелкие и очень мелкие
Штокверки изометричные и линейные	Мурун-Тау (Узбекистан), Наталкинское, Олимпиадинское	Голец Высочайший, Кумтор (Киргизия), Ключевское	Павлик, Благодатное (Хаб. край), Чульбаткан, Березитовое, Дегдекан, Коммунар, Чертово Корыто, Титимухта,	Боголюбовское, Белая гора
Минерализованные зоны	Сухой Лог	Нежданинское Вернинское, Благодатное (Кр край)	Хаканджа, Пионер, Покровское, Албынское, Маломыр, Тарынское, Дрожное, Албазинское	Сопка Кварцевая
Жилы и жильные зоны, дайки		Кючус, Купол, Майское, Бакырчик (Казахстан)	Бамское, Двойное, Березовское, Дарасун, Тасеевское, Воронцовское, Каральвеем, Светлинское, Бадран, Агинское, Асачинское, Александровское, Малеевское	Березняковское, Первенец СР, Владимирское, Кедровское, Штурмовское, р-ник Веселый, Школьное, Родионовское
Залежи, пластообразные, линзообразные		Куранахское РП, Быстринское Многовершинное	Озерновское, Зун-Холба, Светлинское (Хаб. край).	Кундумы, коры выветривания (Средний Урал, Вост. Сибирь)
Трубообразные и штоки			Юбилейное (Казахстан)	Рябиновое, Албын, Кочбулак
<i>Примечание:</i> Приведен далеко не полный перечень мелких месторождений, показаны только те из них, запасы которых относительно недавно рассматривались в ГКЗ РФ.				

Отличительной чертой образований низких структурных уровней является их неравномерная, часто прерывистая насыщенность полезным ископаемым, в результате чего рудные тела занимают только некоторую часть их пространства. Доля объема, «занятого» промышленным оруденением, обычно характеризуется величиной коэффициента рудоносности

( $K_p$ ). В настоящее время его предлагается использовать как количественный показатель для разделения объектов по сложности строения [66].

Коэффициент рудоносности ( $K_p$ ) можно рассматривать как вероятность наличия оруденения в некотором пространстве. Границы этого пространства на ранних стадиях геологоразведочных работ не определены, и единых принципов их проведения не существуют. В различных ситуациях исследователи предлагают проводить их по ореолам с низкими концентрациями полезного ископаемого («природный борт»), границам крайних рудных интервалов, выделенных при низких значениях бортового содержания, или по каким-либо другим признакам. Пример выделения залежи на плане или разрезе по крайним рудным интервалам проведен в работе В.А. Викентьева, И.А. Карпенко, М.В. Шумилина [12]. Эти материалы дополнены анализом результатов такого выделения при сдвиге разведочных пересечений на половину шага сети относительно исходного положения (Рисунок 2.6).

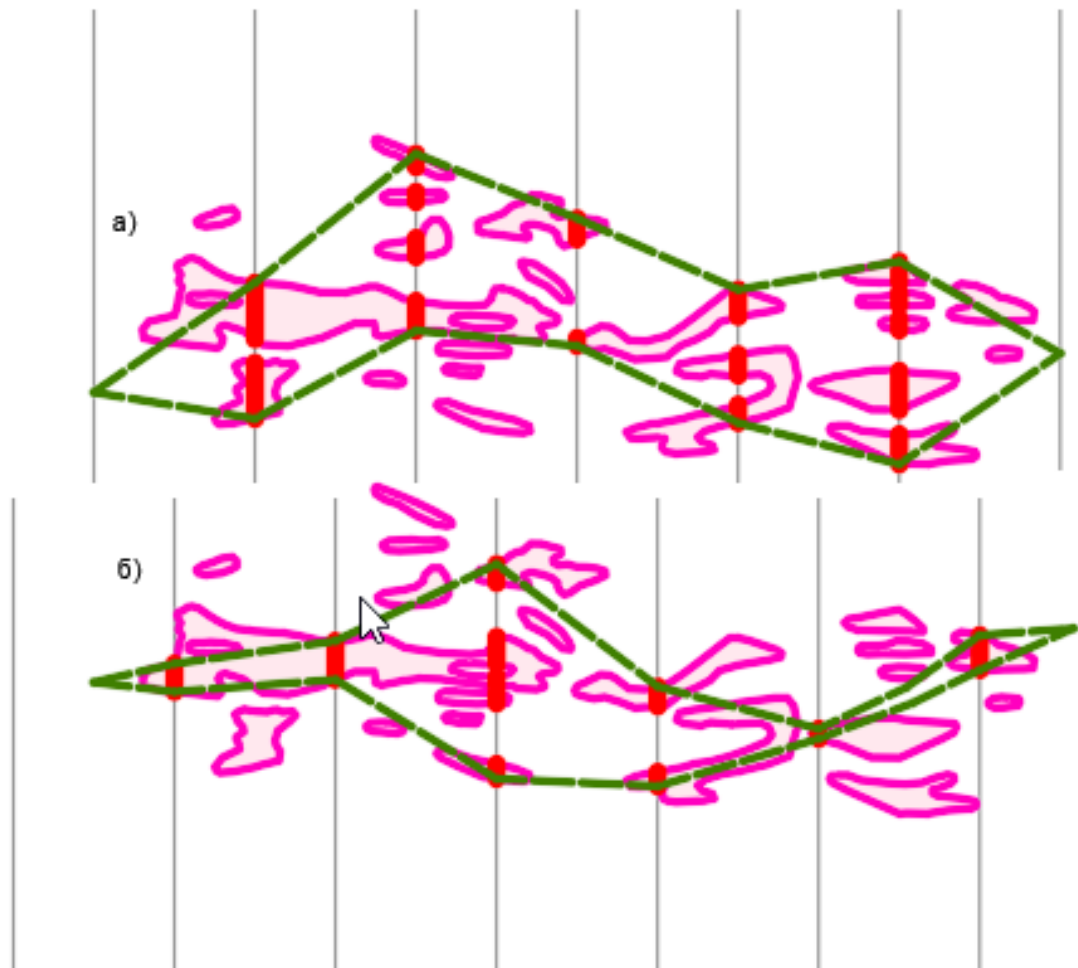


Рисунок 2.6 – Выделение рудоносной залежи по крайним рудным пересечениям (по В.А. Викентьеву и др. с дополнениями)  
 а) при исходном положении; б) при сдвиге на половину шага;  
 красное контуры – рудных тел; зеленое – контуры рудоносной залежи.



В приведенном примере видно, что при данном подходе к выделению залежи определенная часть рудных тел остается за пределами ее изображенного контура. При том же шаге сети сдвиг ее начальной точки (Рисунок 2.6, б) приводит к изменению представлений о форме залежи и положении ее границ. Кроме того, легко представить, что ее контуры могут также измениться при повышении или уменьшении шага сети. В целом, данный прием не обеспечивает надежную геометризацию залежи и не гарантирует попадания в ее границы всех рудных тел.

Более предпочтительным представляется оконтуривание этих объектов по «природному» борту, то есть по установленному статистическим анализом граничному содержанию в околорудном ореоле. В случае устойчивости границ ореола относительно принятой сети устанавливаются единообразные, относительно объективные подходы к определению границ залежей и минерализованных зон. Кроме ореолов основного компонента для выделения рудоносных залежей можно рассматривать геохимические ореолы, характеризующие объемы недр, в разной степени затронутые гидротермальными процессами [21].

#### **2.1.4 Характеристика морфологии рудных тел**

По вопросам количественного описания формы рудных тел имеется относительно большое количество публикаций [7, 8, 12, 14, 25, 31, 39, 44, 45, 93, 94], однако подходы, получившие всеобщее одобрение и признание, четко не сформулированы. Эти объекты являются наиболее трудными для исчерпывающего описания. Основные характеристики их формы зависят от:

- типа рудоконтролирующих факторов: структурных, литологических, метасоматических и др., – определяющих взаиморасположение как единичных тел, так и их системы в целом;
- применяемых кондиционных показателей;
- параметров сети наблюдений.

Выдержанность залегания рудоконтролирующих элементов определяет извилистость границ рудных тел, условия их слияния или расщепления. Осложняющую роль играют пострудные нарушения и смещения по ним.

Кондиционные показатели влияют на объем руды, в том числе на площадь рудных тел в сечениях и на проекциях, а также на число выделяемых рудных интервалов и их мощности, что сказывается на оценке их морфологических свойств (Рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Морфология рудных тел при оконтуривании по разным (а, б, в) бортовым содержаниям (по В.А. Викентьеву и др. [12])

Таким образом, при оконтуривании оруденения по разным кондиционным показателям в различных частях месторождения, например, для условий открытой и подземной отработки, будут выделяться различные по морфологии и по сложности строения объекты (рудные тела). Их объединение в одну группу в подавляющем большинстве случаев нецелесообразно, поскольку для изучения каждого из таких объектов требуется своя разведочная сеть и своя квалификация запасов.

Возможности выявления формы рудных тел и описания ее характеристик определяются плотностью и геометрией сети наблюдений. При редкой сети пересечений форма тел оказывается всегда проще, чем истинная (Рисунки 2.8 - 2.10). С этой точки зрения адекватная характеристика морфологических показателей рудных тел невозможна без наличия участков детализации или участков отработки. В качестве «истинной» следует рассматривать форму, которая устанавливается при проведении эксплуатационных работ, в более детальном ее изучении и отражении нет практической необходимости. Традиционно форма отображается в сечениях (планы и разрезы) или на проекциях, хотя в настоящее время существуют способы ее изображения в 3D виде.

Описание морфологии рудных тел для проекций и для сечений имеет некоторые особенности и различия.

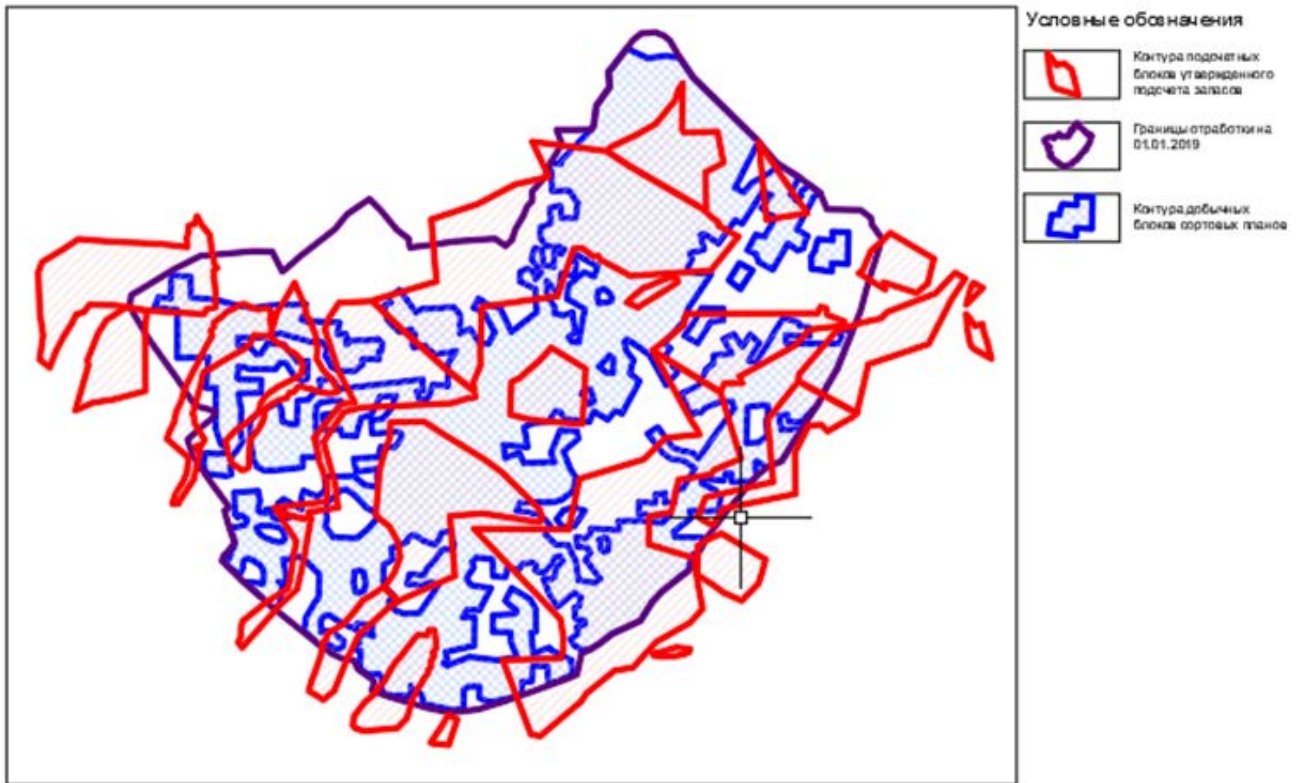


Рисунок 2.8 – Соотношение формы рудных тел по данным разведки (красный контур) и данным сопровождающей эксплуатационной разведки (синий контур) на штоковерковом месторождении.

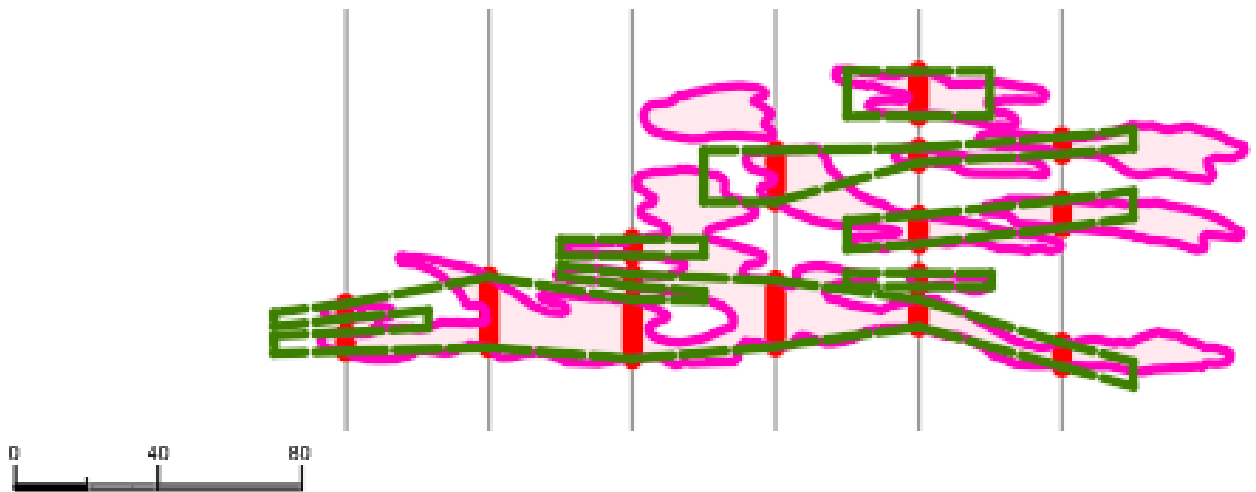


Рисунок 2.9 – «Истинная» форма рудных тел, установленная по данным сопровождающей эксплуатационной разведки (база - 3м) – красное.

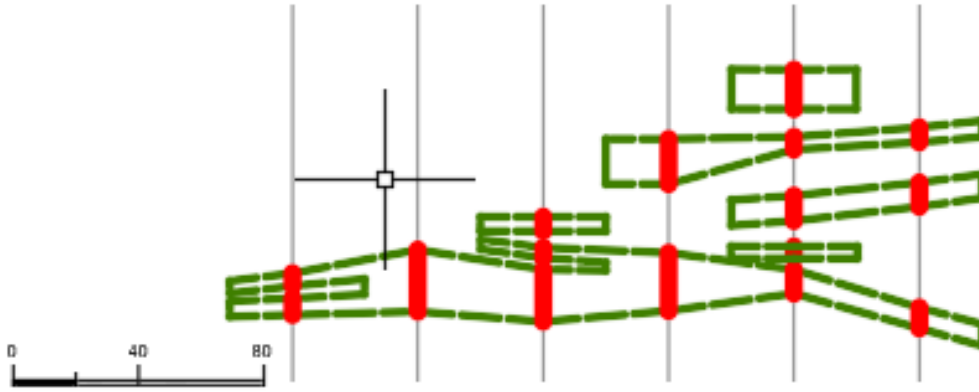


Рисунок 2.10 – Форма рудных тел, установленная по разведочной сети с шагом 40м – зеленое.

Создание проекций (на вертикальную, горизонтальную или наклонную плоскость) характерно для уплощенных объектов, подсчет запасов которых выполняется методом геологических блоков. При использовании данных эксплуатационной разведки на проекциях достаточно объективно определяются площадь рудных тел, размеры по простиранию и падению (по ширине). В качестве дополнительного показателя предлагалось [94] использовать контурный модуль – отношение периметра тела ( $P$ ) к его площади ( $S$ ).

По разведочным данным на проекциях возможно определение тех же показателей, однако, вследствие упрощения формы, площадь по редким пересечениям оценивается с некоторой погрешностью, а измерения средней длины и ширины становятся недостаточно объективными. Контурный модуль  $P/S$ , определенный по относительно редкой сети, содержит в себе систематическую ошибку в сторону занижения, поскольку при измерении периметра не учитываются дополнительные изгибы границ рудного тела.

Особенность определения морфологических характеристик на проекциях заключается в том, что наличие изгибов в положении рудного тела фактически не учитывается. Кроме того, в случае сочленения тел или их расщепления, каждая его часть характеризуется отдельно.

Морфология рудных тел в сечениях является объектом изучения для штокверков, минерализованных зон, залежей неправильной формы и трубообразных объектов. При их изучении по разведочным данным обычно устанавливаются только общие характеристики: площадь и протяженность залежей, их коэффициент рудоносности, а также средняя мощность и ее вариабельность ( $V_m$ ). Подсчет запасов золоторудных месторождений по разведочным данным достаточно часто осуществляется без применения коэффициента рудоносности. В этом случае проводится оконтуривание условно сплошных рудных тел. Этот же прием оконтуривания используется при изучении ошибок геометризации методом разрежения, когда сравнивается «разведочный» контур рудных тел и «истинный» контур рудного тела по детальным данным. В этой ситуации возможно определение «разведочной» площади и средней «измеренной» длины

рудного тела по простиранию. Кроме того, как дополнительный признак может быть определен периметр рудного тела. Величина измеренных показателей зависит от шага сети, при котором они определялись.

В случае наличия участков детализации или планов эксплуатационного опробования (по горизонтам и разрезам) возникает возможность определения дополнительных характеристик: «истинной» площади рудных тел, их средней длины по различным направлениям, а также периметра рудного тела и контурного модуля P/S.

При исследовании ошибок геометризации [7-13] было установлено, что величина этого критерия функционально связана с размерами рудных тел по падению и простиранию. Наиболее простой способ их измерения, описанный в литературе [8, 12, 13], состоит в наложении на «истинные» контуры объекта палетки, по которой выполняются замеры протяженности рудного тела. Ориентировка палетки может меняться с определенным шагом по градусам или радианам (Рисунок 2.11). Вычисляется средняя величина протяженности рудного тела по заданному направлению (Рисунок 2.12).

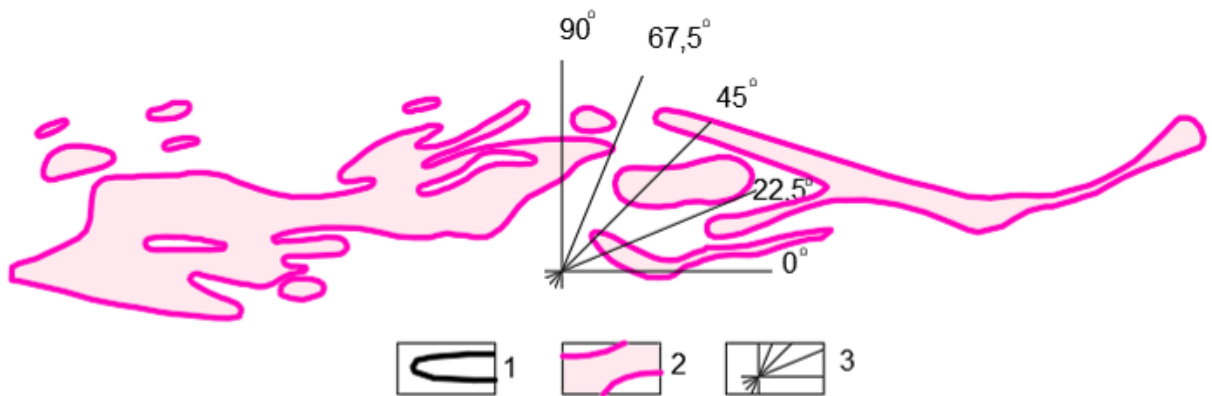


Рисунок 2.11 – Схема определения размеров рудных тел по направлениям  
1 - контур залежи; 2 - рудные тела, 3 – направления измерений.



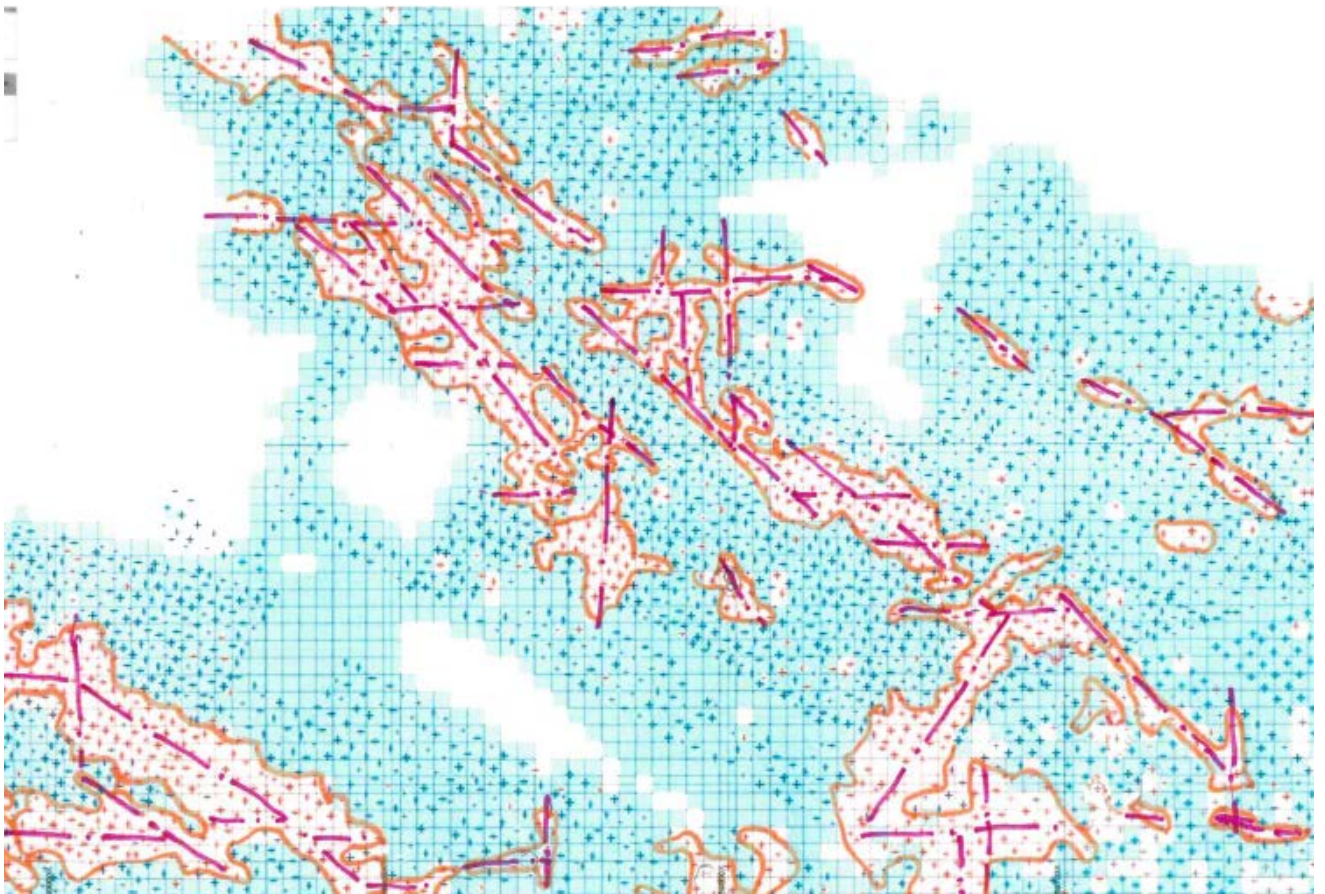
Рисунок 2.12 – Схема определения размеров рудных тел по заданному направлению (по В.А. Викентьеву и др. [12])

Результаты измерений средней протяженности выносятся на круговую диаграмму, концы векторов для наглядности замыкаются. Ориентировка длинной оси полученной геометрической фигуры (эллипса) характеризует направление наименьшей изменчивости формы, короткой оси – направление мощности (в сечениях) или ширины (на проекциях). Соотношение (коэффициент)



длины и ширины, вычисленное для проекций, характеризует анизотропию рудного тела. Ориентировка вектора длинной оси определяет склонение объекта.

При оконтуривании рудных тел по относительно редкой сети, кроме их мощности и площади, можно оценить средние значения длины и ширины в пределах «разведочного» контура. Результаты сравнения этих показателей можно проиллюстрировать на примере месторождения Павлик [20], где «истинная» морфология рудных тел была изучена по данным эксплуатационного опробования на горизонтах и разрезах (Рисунок 2.13). База измерений на горизонтах составляла 5 – 6 м, на разрезах – 5 – 7,5 м. Бортовое содержание золота для оконтуривания рудных тел принято равным 0,6 г/т.



*Рисунок 2.13 – Фрагмент плана горизонта 764 м с контурами рудных тел и рудоконтролирующими структурами по данным сопровождающей эксплуатационной разведки (м-ние Павлик, [20])*

Для оценки показателей морфологии по разведочным контурам использовалась сеть с шагом 50 м, соответствующая фактически созданной на объекте сети для оценки запасов категории С<sub>1</sub>.

Длина рудных тел относительно разведочного контура (измеренная длина) определена в процессе экспериментов по изучению ошибок геометризации методом разрежения. Результаты морфологического анализа рудных тел при разных условиях измерений (по данным СЭР и ГРР) приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Характеристики формы рудных тел по горизонтам и разрезам

Показатели \ объекты	гор. 764	гор. 740	гор.716	пр. 16	пр. 17	пр. 19
По данным сопровождающей эксплуатационной разведки						
Площадь, м <sup>2</sup>	14900	14100	5775	8650	7520	4400
Средняя гор. мощность, м	18,2	8,8	11,6	10,8	13,2	11,5
Средняя ист. длина, м	33,0	26,5	24,2	22,2	21,8	23,8
По разведочным данным						
Сред. изм. длина, шаг - 50м	83,5	69,0	61,9	49,5	56,2	72,4

Видно, что измеренная по разведочным данным средняя длина рудных тел оказывается систематически выше (почти в 2,5 раза), чем истинная, определенная на стадии эксплуатации. Это различие объясняется недостаточной плотностью разведочной сети для выявления деталей строения рудных тел. Согласование «истинных» и «разведочных» размеров рудных тел требует введения поправок, учитывающих параметры исходной и предельно плотной сети.

Из приведенного примера сравнения также следует, что отдельные части месторождения различаются по морфологическим характеристикам, например, на изученной части горизонта с отметкой 764 м средняя мощность и средняя длина рудного тела существенно больше, чем на горизонте 740 м. Это обстоятельство говорит о возможности и необходимости изучать морфологию оруденения по отдельным геологически однородным участкам – доменам.

## 2.2 Изучение изменчивости геологоразведочных параметров

Значения, характеризующие свойства природных объектов, в том числе содержания полезных компонентов, могут рассматриваться в двух аспектах: как случайные и взаимонезависимые величины и как величины, связанные с их положением в пространстве.

В первом случае инструментом их изучения является аппарат математической статистики или статистический анализ. Во втором случае способами их исследований могут являться методы горной геометрии и геостатистический анализ. Первый подход практически исключает влияние случайной компоненты в пространственном изменении признака. Последний подход рассматривает все варианты соотношений случайной и закономерной составляющей его изменчивости. В настоящее время широкое распространение получили компьютерные горно-геологические информационные системы (ГГИС), которые включают в себя все способы количественного описания изменчивости геологоразведочных параметров [35, 50, 52, 60, 75, 95, 97].

### 2.2.1 Статистический анализ

Изменчивость геологоразведочных параметров в современных условиях характеризуется на основе методов математической статистики. Теоретическими основами для описания генеральных совокупностей являются: закон распределения, математическое ожидание значений

признака и дисперсия. Для выборочных данных, к которым относятся результаты количественных определений значений признака при изучении месторождений, используются понятия: эмпирическое распределение, объем выборки, выборочное среднее и дисперсия.

Корректность использования формул статистики увязывается с соответствием эмпирического распределения какому-либо теоретическому закону: нормальному, логарифмически нормальному, биномиальному, Вейбулла, гамма-функции и др. [6, 76, 77]. Для проверки такого соответствия в современных программных комплексах имеются определенные процедуры.

Дисперсия значений признака по выборке  $[D(x)]$  при условии соответствия эмпирического распределения нормальному закону, а также случайности и независимости наблюдений определяется по формуле:

$$D(x) = S^2(x) = \sum (x_i - X)^2 / (N - 1) \quad (2.1)$$

где  $x_i$  –  $i$ -ое значение признака в выборке;  
 $X$  – среднее выборочное значение;  
 $S(x)$  – среднеквадратичное/стандартное отклонение;  
 $N$  – объем выборки.

Степень изменчивости признака обычно характеризуется через коэффициент вариации ( $V$ ), вычисляемый как:

$$V = 100 * S(x) / X \quad (2.2)$$

В рамках исследований по данной тематике важной задачей является оценка погрешности определения средних содержаний полезного компонента по выборкам. Для ее решения необходимо вычислить дисперсию выборочного среднего  $D(X)$ , которая рассчитывается как:

$$D(X) = S^2(X) = D(x) / N \quad (2.3)$$

Доверительный интервал оценки выборочного среднего в относительном виде ( $\lambda$ ) вычисляется как:

$$\lambda = t_a * S(X) / X \quad (2.4)$$

или

$$\lambda = t_a * V / \sqrt{N} \quad (2.5)$$

где  $t_a$  – значение критерия Стьюдента при доверительной вероятности  $\mathbf{a}$ .

Следует подчеркнуть, что степень изменчивости признака в выражении (2.4) оценивается величиной коэффициента вариации его исходных значений, то есть по замерам в пробах.

Практика изучения изменчивости содержаний на золоторудных месторождениях показывает, что в подавляющем числе случаев их распределение не соответствует нормальному



закону, с некоторыми допущениями оно обычно описывается как логарифмически нормальное распределение. Для значительной части распределений, не соответствующих нормальному, теоретическим положениям математической статистики и теории вероятностей установлены выражения, позволяющие охарактеризовать изменчивость признаков в этих условиях. В наибольшей степени они разработаны для логарифмически нормальных распределений [6, 31, 41, 76, 83].

Данные, предназначенные для изучения методами статистики, дополнительно обладают рядом особенностей. В их числе можно отметить:

- ограниченность объема выборок, при котором невозможно определить вид распределения;

- «усеченность» распределений по пробам для рудных интервалов, связанная с исключением проб с относительно низкими содержаниями, не удовлетворяющими требованиям кондиций;

- корреляция содержаний в пробах - фактор связности.

Возможности использования приемов математической статистики в условиях выборок разного объема исследована в ряде работ [22, 56, 83]. Другие факторы исследованы в меньшей степени, однако в практике обработки геологоразведочных данных для решения определенных задач они фактически считаются несущественными. Последний фактор, определяющий несоответствие выборки условию случайности наблюдений, с позиций корректности применения формул математической статистики практически не рассматривался, хотя его наличие постоянно фиксируется при построении вариограмм.

Наличие данных факторов: логнормальности, усеченности, связности, – почти никогда не учитывается при характеристике вариабельности содержаний в геологических отчетах. Оценка выборочного среднего проводится по выборкам достаточно большого объема, что теоретически в соответствии с законом больших чисел позволяет исключить влияние «логнормальности» и «усеченности» на результаты расчетов.

Для подтверждения этого положения проведены исследования на модельных примерах с исходным объемом выборки более 1000 замеров. Выборка имитирует результаты опробования на золото по разведочным пробам. Данные являются случайными и взаимонезависимыми. Гистограмма содержаний исходных значений приведена на рисунке 2.14. Статистическое распределение признака обладает резкой асимметричностью.

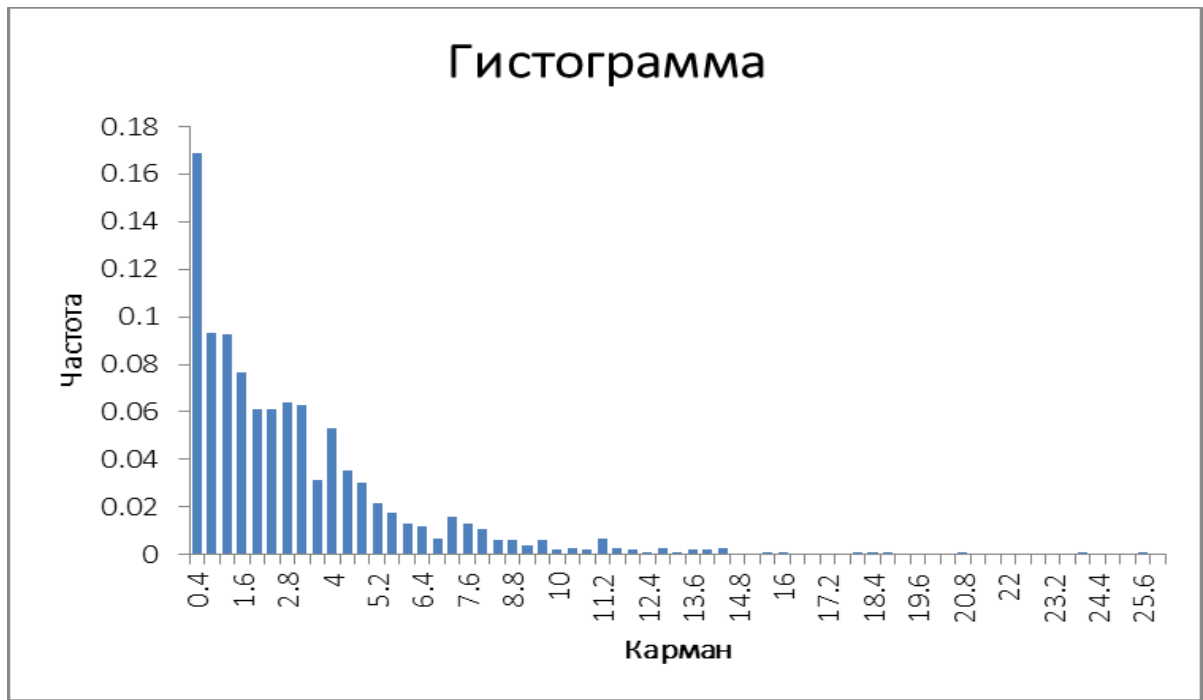


Рисунок 2.14 – Гистограмма распределения содержаний золота в исходной выборке

Построение гистограммы логарифмов содержаний (Рисунок 2.15) показывает, что распределение близко соответствует логарифмически нормальному закону.

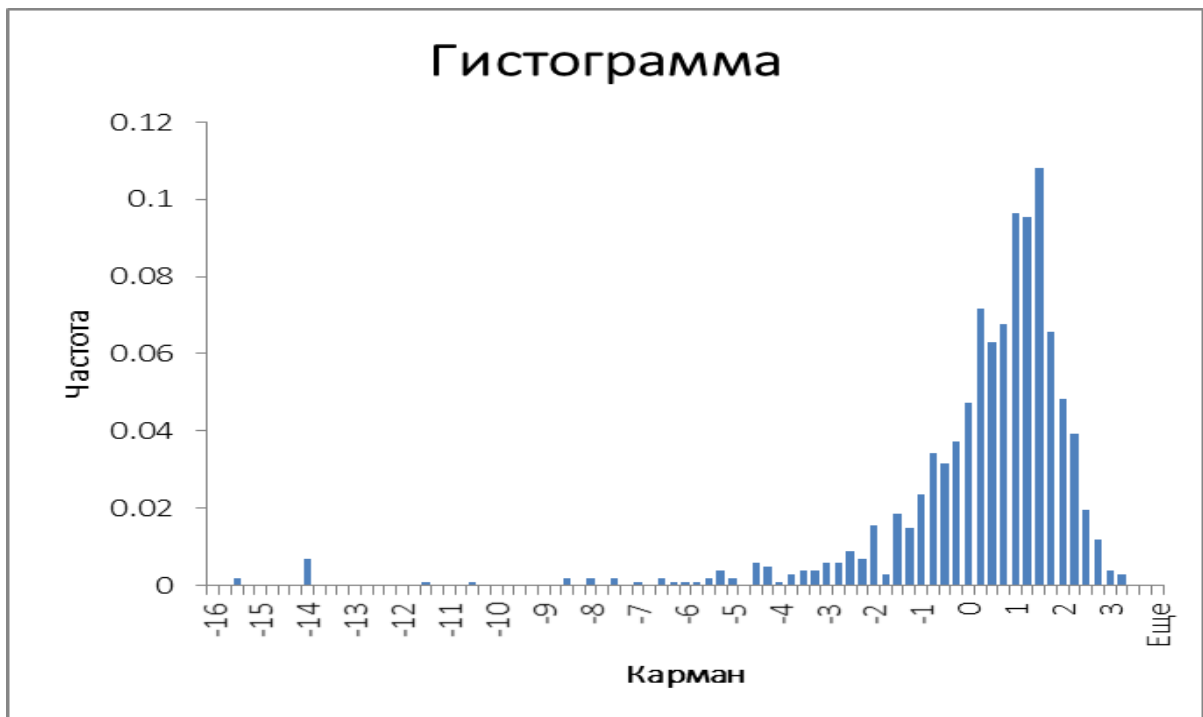


Рисунок 2.15 – Гистограмма распределения логарифмов содержаний золота в исходной выборке

Из исходной выборки путем исключения низких содержаний (менее 0,5 и менее 1,0 г/т) получены две «усеченные» выборки, имитирующие результаты оконтуривания оруденения по вариантам кондиций. Гистограммы распределений содержаний и их логарифмов приведены на рисунках 2.16 и 2.17.

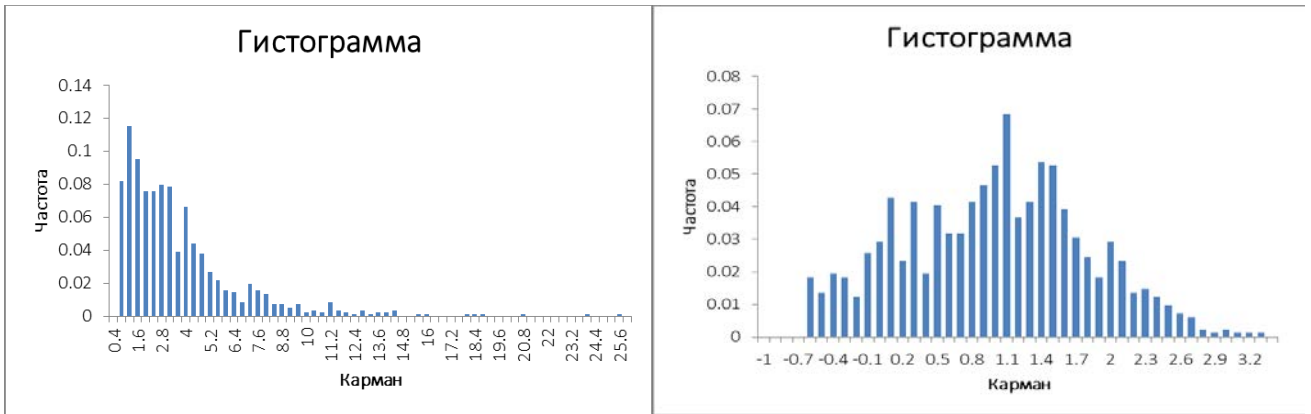


Рисунок 2.16 – Гистограммы распределения содержаний (слева) и их логарифмов (справа) по выборке, ограниченной содержанием 0,5 г/т

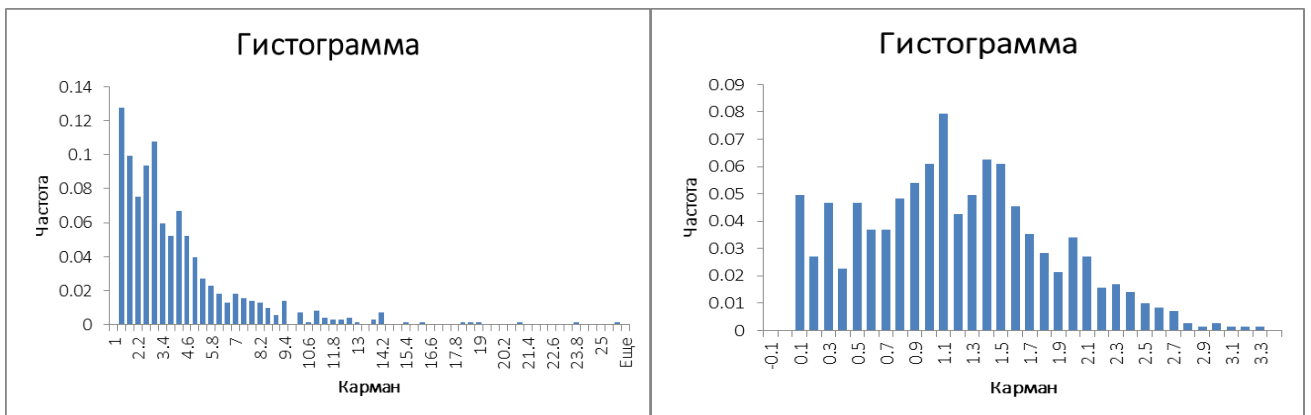


Рисунок 2.17 – Гистограммы распределения содержаний (слева) и их логарифмов (справа) по выборке, ограниченной содержанием 1,0 г/т

Далее из исходных совокупностей создавались частные выборки объемами по 50 значений. Такое количество обычно считается достаточным для получения статистически надежных выводов. Для каждого варианта оконтуривания получено от 28 до 35 выборок, для которых изучены распределение и величина дисперсии средних значений. Для сравнения вычислены теоретические значения дисперсий по выражению (2.3). Статистические характеристики исходных данных при разных значениях бортовых содержаний и выборок объемом по 50 штук приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Статистические характеристики исходных и выборочных данных.

Параметры	Тип	Выборки		
		Все данные	Борт 0.5	Борт 1
объем выборки	исходные данные	1018	818	706
среднее содержание		2,86	3,51	3,94
дисперсия		9,41	9,53	9,54
коэффициент вариации		107,2 %	87,9 %	78,3 %
число выборок	выборки объемом 50 шт.	35	32	28
дисперсия средних сод.		<b>0,232</b>	<b>0,213</b>	<b>0,171</b>
теоретическая дисперсия		0,188	0,191	0,191

При ограничении данных исходной выборки бортовыми содержаниями увеличиваются средние содержания и снижается величина коэффициента вариации, дисперсия значений остается практически на одном уровне.

Дисперсия средних значений по выборкам достаточно хорошо согласуется с ее теоретической величиной, их различия по критерию Фишера являются незначимыми.

Для средних значений по выборкам построены графики распределений, приведенные на рисунке 2.18.

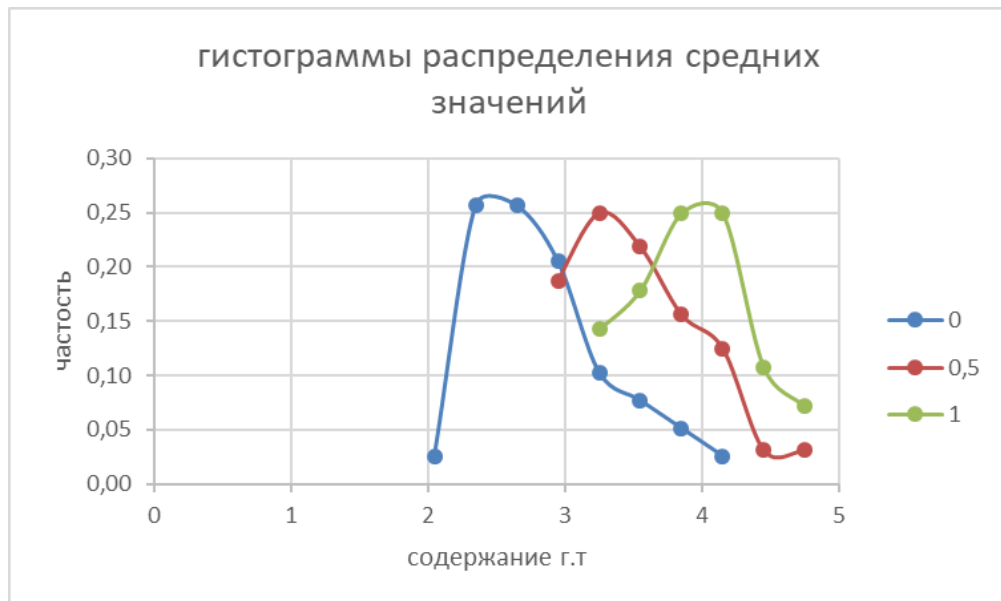


Рисунок 2.18 – Распределения средних содержаний по выборкам объемом 50 шт. при разных уровнях ограничения бортовыми содержаниями

Средние содержания по выборкам объемом 50 значений обнаруживают тенденцию к «нормализации» распределений, хотя их некоторая асимметричность сохраняется.

В целом выполненный эксперимент показывает, что несоответствие нормальному распределению исходных данных, а также их ограничение бортовыми содержаниями не оказывает существенного влияния на распределения средних значений по выборкам относительно большого объема, изменение их дисперсии соответствует правилу  $1/N$ , что позволяет оценивать погрешности определения средних значений содержаний без учета отмеченных факторов.

Аналогичные выводы были представлены в работе Усикова Ю.Т. [83], проводившего сравнение результатов вычисления погрешности оценки среднего с использованием «классической» формулы и формулы, учитывающей наличие логнормального распределения. В первом случае погрешность/доверительный интервал вычисляется по формуле (2.5). Во втором случае, учитывающем логнормальность распределения, используется формула:

$$\lambda = 100 * \left( e^{t_a * S_1 / \sqrt{N}} - 1 \right) \quad (2.6)$$

где  $S_1$  – стандартное отклонение натуральных логарифмов.

Величина  $t_a$  во всех случаях принята равной 1.

Результаты сравнения (Рисунок 2.19) показывают, что различие между оценками, полученными по формуле 2.5 (график 1) и по формуле (2.6) (график 2) становится несущественным, начиная с объема выборок 20 – 30 шт.

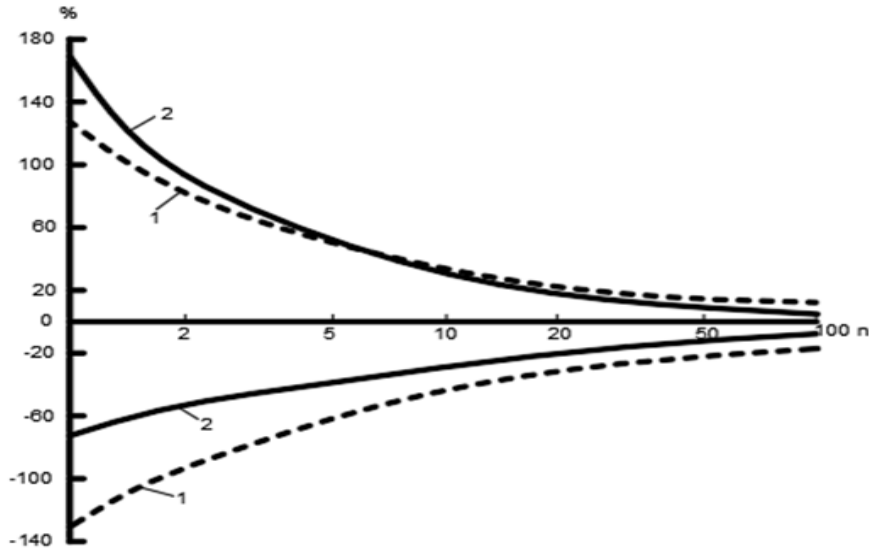


Рисунок 2.19 – Зависимость относительных погрешностей среднего арифметического от числа наблюдений при логнормальном законе распределения случайной величины

При использовании формул математической статистики предполагается, что исходные данные являются одинаково значимыми, то есть имеют одинаковый статистический вес.

При проведении опробования и последующей обработке его результатов достаточно часто формируются выборки, в которых условие одинаковой значимости не соблюдается. Распространенным способом отбора проявляется секционный, когда длина пробы выбирается в соответствии мощностью природной разновидности руд. Этот подход объясним с позиций экономии средств на опробование: нет смысла отбирать дополнительные пробы внутри однородного материала, если результаты замеров содержаний будут с большой вероятностью предсказуемы. Вместе с тем, секционные пробы, имеющие разную длину/геометрическую базу, непригодны в непосредственном виде для обработки методами математической статистики. В таких выборках за счет разной длины проб искажается частота встречаемости значений признака, среднеарифметическое содержание в выборке не соответствует средневзвешенному содержанию, которое учитывает разную длину проб и используется далее при подсчете запасов. Дисперсия признака по таким выборкам становится абстрактной величиной, дальнейшее использование которой приводит к ошибочным результатам.

Аналогичным образом не имеет смысла оценка изменчивости содержаний по рудным интервалам, имеющим разную длину. Несмотря на то, что обработка данных по таким геометрически неоднородным выборкам широко распространена в отечественной практике для

оценки вариабельности содержаний, получаемые показатели: дисперсия, коэффициент вариации, - также являются ничего не характеризующей абстракцией.

Способом преодоления этой ситуации является проведение композитирования, то есть пересчета содержаний на интервалы одинаковой длины. Такая процедура предусмотрена в современных компьютерных ГГИС. Длина композитов обычно выбирается равной средней длине интервала опробования. При изучении маломощных жил длина композита может соответствовать модальному значению длины проб. В связи с этим основными элементами, относительно которых возможна корректная оценка изменчивости содержаний на месторождении, являются пробы равной длины или композиты. Такой подход широко используется в современных компьютерных технологиях как для статистических, так и для геостатистических исследований.

Важным условием изучения изменчивости является определение объекта, относительно которого оно проводится. В качестве таких объектов могут рассматриваться зоны минерализации, выделенные по «естественному» борту, рудные залежи, принципы оконтуривания которых определены, конкретные рудные тела, геометризованные по данному варианту кондиций. В тех случаях, когда композиты недостаточно полно «вписываются» в границы изучаемых объектов, их длина может несколько отличаться от принятой стандартной величины. Допускается также сокращение длины композита для лучшего соответствия мощности изучаемого объекта.

Влияние коррелируемости наблюдений на характеристики изменчивости будет рассмотрено в разделе 2.2.2.

### **2.2.2 Геостатистический анализ и основы блочного моделирования**

В настоящее время в практику геологоразведочных работ и в представление их результатов широко внедряются горно-геологические информационные системы (ГГИС). Они предназначены для решения задач разведки и добычи твердых полезных ископаемых и широко используются геологоразведочными организациями, горнорудными предприятиями и консультационными фирмами.

Использование ГГИС обеспечивает обработку исходных числовых и текстовых данных, получение на этой основе новой информации об изучаемых объектах, дальнейший анализ этой информации, обобщение графической информации и формирование новых графических документов по результатам различных видов сведений. В основу ГГИС, используемых для решения задач геолого-экономической оценки и освоения месторождений, положены данные геостатистических исследований и результаты блочного моделирования.

Геостатистические методы оценки запасов были предложены Ж. Матероном в 1963 г. [65]. Они являются прикладным следствием теории случайных функций, которая накладывает определенные ограничения на исходные данные, используемые для расчетов. К ним относятся требования стационарности и эргодичности исследуемых функций.

Одним из основных инструментов геостатистических исследований является построение вариограмм – функций, которые описывают параметры распределения разностей («приращений») изучаемого признака между точками наблюдений в зависимости от расстояния между ними ( $h$ ).

Для построения эмпирических вариограмм  $\gamma(h)$  используется выражение:

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

где  $Z(x_i)$  – значение признака в точке  $x_i$ ;

$h$  – расстояние между точками наблюдения,

$N(h)$  – число пар сопоставляемых точек.

Экспериментальная вариограмма (синоним – полувариограмма, т.е. деленная на 2), описывается аппроксимирующей математической функцией, что позволяет оценивать неизвестные значения исследуемого параметра в любой точке данного пространства. Относительно известных значений признака в точках наблюдений (пробах), окружающих ячейку, вычисляются весовые коэффициенты, используемые для интерполяции. В рамках «линейной» геостатистики для вычисления коэффициентов рассматривается использование системы линейных уравнений. В более сложных случаях могут применяться «нелинейные» методы и условное стохастическое моделирование. Одним из видов нелинейного преобразования является процедура «индикации». Она заключается в присвоении пробам, превышающим бортовое содержание, значения 1, а ниже его – значения 0. Значения индикатора характеризуют вероятность наличия кондиционного оруденения в точках исследуемого пространства.

*Блочное моделирование* заключается в представлении объема недр в виде совокупности элементарных блоков определенного размера, в которых рассчитываются характеристики свойств месторождения. Основным из свойств обычно является содержание полезного компонента. Процедура присвоения ячейкам блочных моделей значения признака называется интерполяцией. Она, как правило, осуществляется *геостатистическими* методами на основе весовых коэффициентов, вычисляемых по аппроксимирующим/модельным функциям для проб, окружающих ячейку. Кроме того, весовые коэффициенты могут определяться другими детерминистическими методами, когда параметры модельной функции задаются *априори*. Наибольшей популярностью пользуется метод обратных расстояний или IWD. Интерполяция может выполняться также способом «ближайшего соседа» или «среднеблочным» способом.

Разновидностью блочных моделей являются «сеточные», которые используются для описания маломощных объектов: жил, пластов, россыпей. В этом случае ячейки выделяются только в плоскости тела, их «высота» определяется мощностью рудного тела.

*Геостатистическое моделирование* состоит в исследовании свойств пространственного размещения полезного ископаемого, которое проводится с помощью вариограмм. На основе выявленных характеристик осуществляется интерполяция свойств (содержаний) в ячейки модели.

Процедура нахождения оценок признака в ячейках/точках изучаемого пространства получила название «кригинг» в честь южноафриканского инженера-геолога Д. Криге [65], результаты исследований (Рисунок 2.20) которого на золоторудных объектах Витватерсранда, явились предпосылкой для разработки методов геостатистики [23, 31, 35, 65, 75, 95, 97].

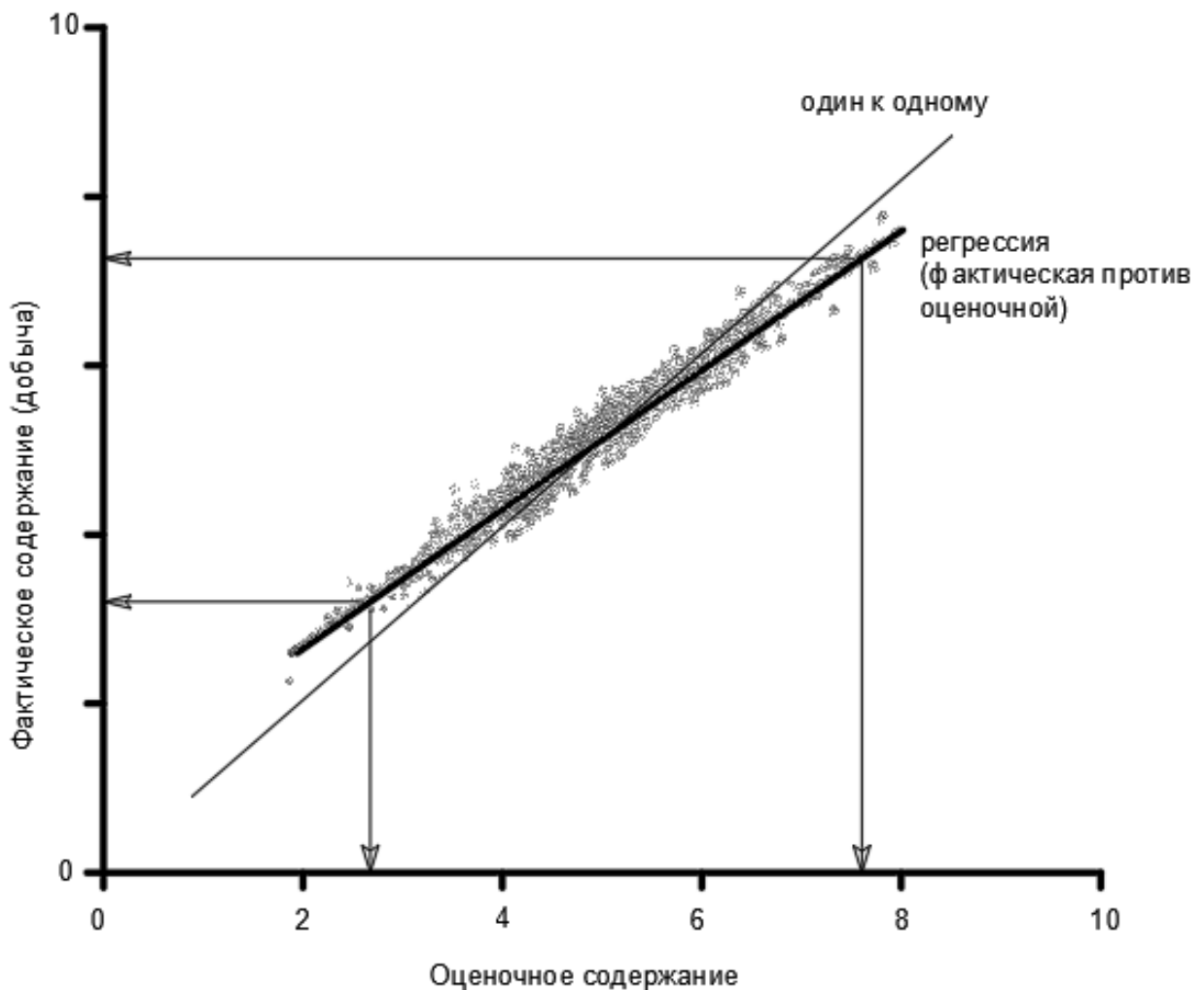


Рисунок 2.20 – Соотношения между фактическими (валовые пробы) и оценочными (бороздовые пробы) содержаниями по Д. Криге (из кн. Дж. Кумбс [97])

Д. Криге было установлено, что между содержаниями золота в валовых пробах и сопряженных с ними бороздовых пробах нет полного соответствия, для низких классов



содержаний валовые пробы давали систематически большее содержание, чем борзодовые. В то же время в области высоких содержаний по валовым пробам происходило их занижение относительно борзодовых. По мнению Ж. Матерона, это несоответствие устраняется в результате применения аппарата геостатистики. Следует отметить, что данный вывод справедлив для относительно плотных сетей наблюдений, когда между соседствующими замерами содержаний наблюдается высокая корреляционная связь.

Подготовка исходных данных к геостатистическим исследованиям может включать композитирование и декластеризацию. Композитирование предполагает проведение пересчета содержаний применительно к пробам (интервалам) равной длины. Декластеризация направлена на снижение неравномерности сети за счет объединения параметров по сближенным разведочным пересечениям. При подготовке данных устраняется влияние систематических ошибок в определении значений признака. По необходимости производится также выявление и ограничение выдающихся («ураганных») значений содержаний.

Вид эмпирических вариограмм зависит от ряда факторов, в том числе от представительности участка, на котором проводятся исследования, и плотности сети наблюдений в его пределах, от степени изменчивости признака, от параметров опробования и др. Вид аппроксимирующих вариограмм определяется выбором модельных функций, которые должны наиболее полно описывать установленные закономерности. На графиках в структуре типичных вариограмм выделяется ряд элементов (Рисунок 2.21).

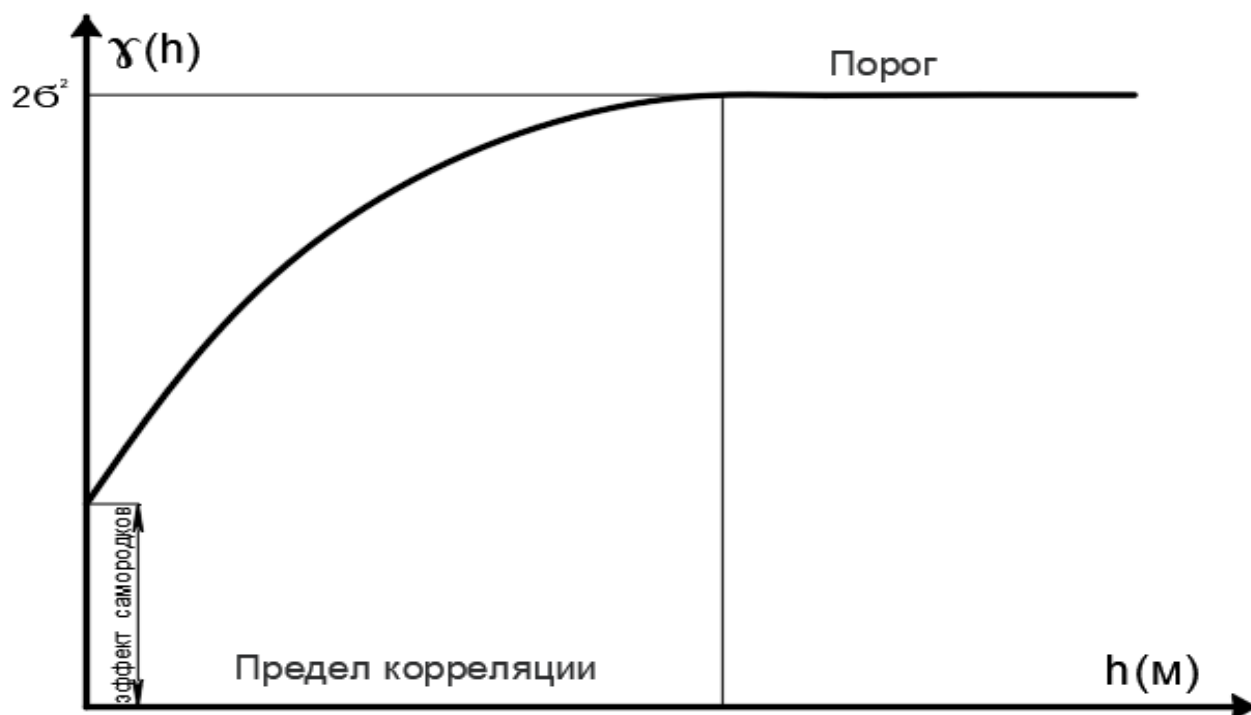


Рисунок 2.21 – Элементы строения вариограммы

Вариограммы, построенные для реальных объектов, имеют обычно возрастающий характер по мере изменения параметра  $h$  – расстояния между точками наблюдений. График выходит на пороговые значения (sill) при достаточно больших значениях  $h$ , их уровень соответствует общей дисперсии признака (содержаний) в пробах. В ряде случаев для наглядности вариограмма изображается в нормированном виде, то есть как деленная на общую дисперсию. Расстояние, при котором график вариограммы выходит на плато, характеризуется как зона влияния или радиус/предел корреляции (range). Длина радиуса в целом соответствует размеру геологически однородного участка в размещении признака по данному направлению.

Общая дисперсия ( $D_{об}$ ) характеризует разброс значений признака в точках наблюдения относительно среднего значения, вычисленного по всей выборке, характеризующей изучаемый объект.

В области нулевых значений параметра  $h$  вариограмма имеет определенную величину, которая получила название «эффект самородков» (nugget effect). Дисперсия самородков ( $C$ ) или эффективная дисперсия по А.В. Каждану [31] характеризует случайные колебания значений признака в исключительно локальной области. По мнению М. Абзалова [95] дисперсия самородков может быть корректно определена через различия содержаний полезного компонента в половинках керна. В целом дисперсия самородков характеризует представительность опробования и регулируется методикой отбора и обработки проб, а также точностью аналитических работ. При прочих равных условиях дисперсия самородков в максимальной степени зависит от сечения пробы, она меняется обратно пропорционально его площади.

Разность между общей дисперсией ( $D_{об}$ ) и эффективной дисперсией ( $C$ ) можно определить как пространственную дисперсию  $D_{пр}$ , которая характеризует различие значений признака в точках изучаемого пространства в «чистом» виде, без учета влияния методических и технических ошибок опробования, которые имеют в целом субъективный характер. Эта компонента изменчивости оценивается как:

$$D_{пр} = D_{об} - C \quad (2.8)$$

В свою очередь, в зависимости от соотношения шага сети и радиуса корреляции, пространственная изменчивость  $D_{пр}$  может быть разделена на закономерную и случайную составляющие:

$$D_{пр} = D_{зак}(h) + D_{сл}(h) \quad (2.9)$$

Это положение графически отображено на рисунке 2.22.

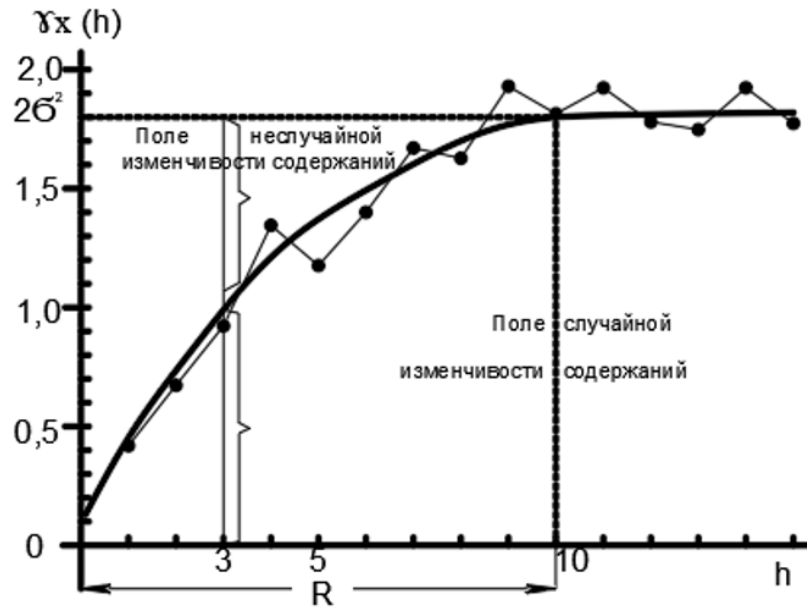


Рисунок 2.22 – Соотношение закономерной и случайной составляющих дисперсии в зависимости от шага наблюдений (по А.Б. Каждану [31]).

Закономерная составляющая изменчивости выявляется в том случае, когда шаг сети не превышает радиуса корреляции ( $R$ ). Ее доля снижается при увеличении расстояния между точками наблюдений. Выявление закономерной составляющей приводит к снижению уровня случайных колебаний значений признака и повышению точности его определения на исследуемых объектах. С теоретических позиций эта компонента также должна учитываться при оценке погрешности определения средних значений признака.

Влияние шага сети на случайную компоненту изменчивости определяется как характером вариограммы, так и величиной дисперсии самородков; возможны случаи, когда закономерная составляющая может отсутствовать или составлять незначительную долю от общей дисперсии вследствие высокого уровня эффекта самородков. Для значительной части реальных геологических объектов экспериментальные вариограммы описываются сферическими или экспоненциальными модельными функциями, для которых характерен «выпуклый» вид графиков (Рисунок 2.22). В этом случае существенное сгущение сети не приводит к пропорциональному изменению доли закономерной компоненты. На представленном рисунке видно, что сгущение шага сети в 3 раза привело только к двухкратному сокращению доли случайной компоненты. При этом стандартное отклонение случайной компоненты изменчивости уменьшается примерно на 30%. Из приведенных соображений следует, что наличие закономерной составляющей в изменении признака может оказывать влияние на погрешность оценки запасов только в случае достаточно плотной сети наблюдений. При параметрах сетей, создаваемых на стадии разведки (категории  $C_1$  и  $C_2$ ), погрешность может определяться по «случайной» схеме, то есть без учета закономерностей в изменении признака.

Вариограммы строятся по различным направлениям (Рисунок 2.23), включая векторы, различающиеся дирекционными углами и углами наклона. Это позволяет определять направления минимальной, средней и максимальной изменчивости в объеме объекта (домена) и оценивать его анизотропию по соотношению средних размеров элементов неоднородности.

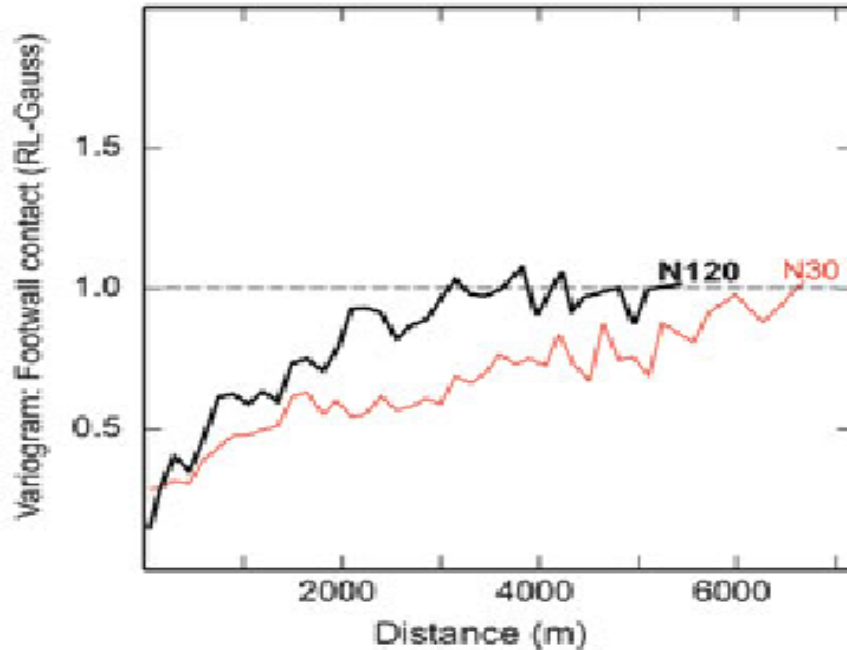


Рисунок 2.23 – Эмпирические вариограммы по азимутам 120° и 30° (Abzalov, 2016 [95])

Результаты построения вариограмм по разным направлениям в простых случаях могут быть отражены на двумерной диаграмме (Рисунок 2.24), наглядно показывающей направления минимальной и максимальной изменчивости.

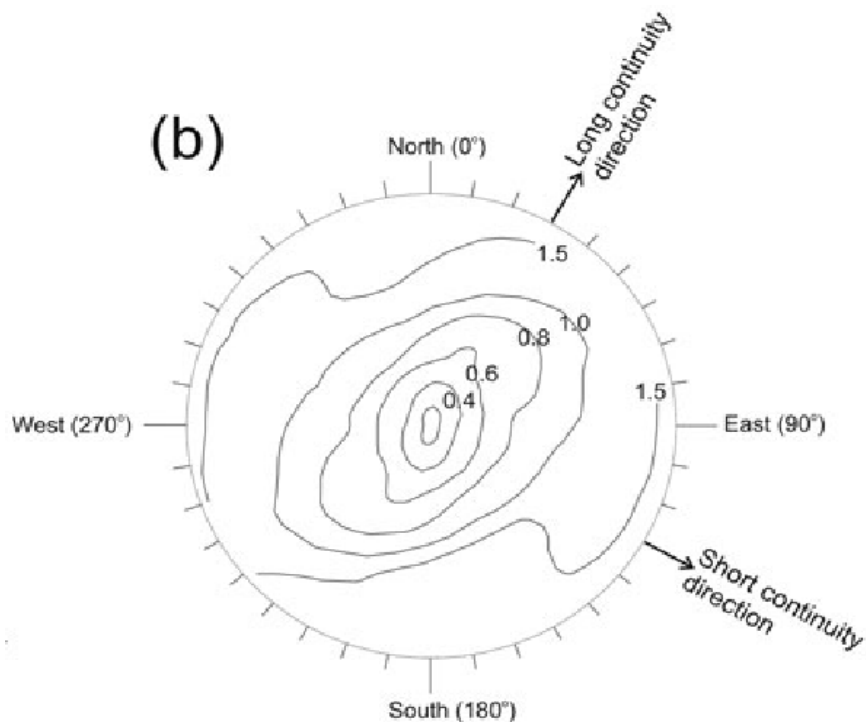


Рисунок 2.24 – Изменения характеристик вариограмм по направлениям (Abzalov, [95])

В дальнейшем установленная анизотропия объектов [62] используется при создании блочных моделей и определении их параметров.

При построении эмпирических вариограмм на ранних стадиях геологоразведочных работ следует иметь в виду, что представительность вариограммы в области низких значений шага разведочной сети будет определяться наличием участков детализации или локальных участков сгущения сети. При отсутствии этих условий построение вариограмм становится невозможным или ненадежным.

Геостатистические исследования так же, как статистические расчеты, должны приводиться применительно к определенному объекту. На ранних стадиях изучения месторождения вариограммы строятся преимущественно по зонам минерализации. При детализации работ и переходе к более высоким уровням рудных образований: залежам и телам, – изменяется (сокращается) общий уровень дисперсии признака (sill) и предел корреляции (range).

По вариограммам, построенным для рудных тел при фиксированных кондиционных показателях, имеется возможность не только определить общий уровень дисперсии содержаний, но и оценить влияние коррелированности исходных данных на характеристики их изменчивости. При параметрах сетей, применяющихся для оценки запасов по категориям  $C_1$  и  $C_2$ , корреляция содержаний в пробах, принадлежащих соседним пересечениям, практически отсутствует. Их взаимосвязь проявляется главным образом по длине самих разведочных пересечений, что отражается на виде вариограммы, построенной вдоль их осей.

С теоретических позиций для оценки случайной компоненты изменчивости ( $D_{сл}(h)$ ) при наличии коррелированности содержаний в соседних пробах необходимо введение поправки в величину общей дисперсии ( $D_{об}$ ):

$$D_{сл}(h) = D_{об} * \gamma(h)^* \quad (2.10)$$

где  $\gamma(h)^*$  – значение нормированной вариограммы по оси выработки при  $h$  равном длине пробы или композита.

Практическое использование выражения 2.10 для учета влияния закономерной составляющей при оценке дисперсии признака в рудных телах, оконтуренных по определенным кондициям, требует расчета вариограмм именно для них, это условие выполняется далеко не во всех случаях.

Как показывает опыт исследований, в реальных ситуациях эта поправка является незначимой, поскольку значение  $\gamma(h)^*$  оказывается достаточно близким к 1. В то же время в случае малой длины проб относительно мощности рудного тела может происходить существенное снижение значения вариограммы, введение поправки тогда оказывается необходимым. Следует отметить, что такие ситуации являются неоптимальными с точки зрения

затрат на проведение опробования, снижение длины проб не приводит к пропорциональному увеличению информации об изменчивости объекта.

Для использования результатов геостатистических исследований при блочном моделировании выполняется аппроксимация экспериментальных вариограмм модельными функциями. В качестве таких функций используются линейная, экспоненциальная, круговая, сферическая, де Вийса и другие или их комбинации – двух-, трехструктурные функции [35, 44, 95, 97].

Геостатистический анализ может использоваться для характеристики морфологии рудных тел и определения их средних размеров по разным направлениям. С этой целью по объектам строятся вариограммы индикаторов, которые определяются для рудных тел, оконтуренных по установленным кондиционным показателям. Предварительно в базе данных пробы, принадлежащие рудным интервалам, маркируются индексом 1, а разделяющие их безрудные или некондиционные промежутки обозначаются индексом 0. Исследования выполняются в пределах доменов, ограниченных каркасами.

Наиболее важной характеристикой индикаторных вариограмм является «предел корреляции», то есть значение расстояния между наблюдениями, при котором график становится горизонтальным или имеет точку резкого перегиба. Пример такой вариограммы для месторождения Павлик при бортовом содержании 0,4 г/т приведен на рисунке 2.25.

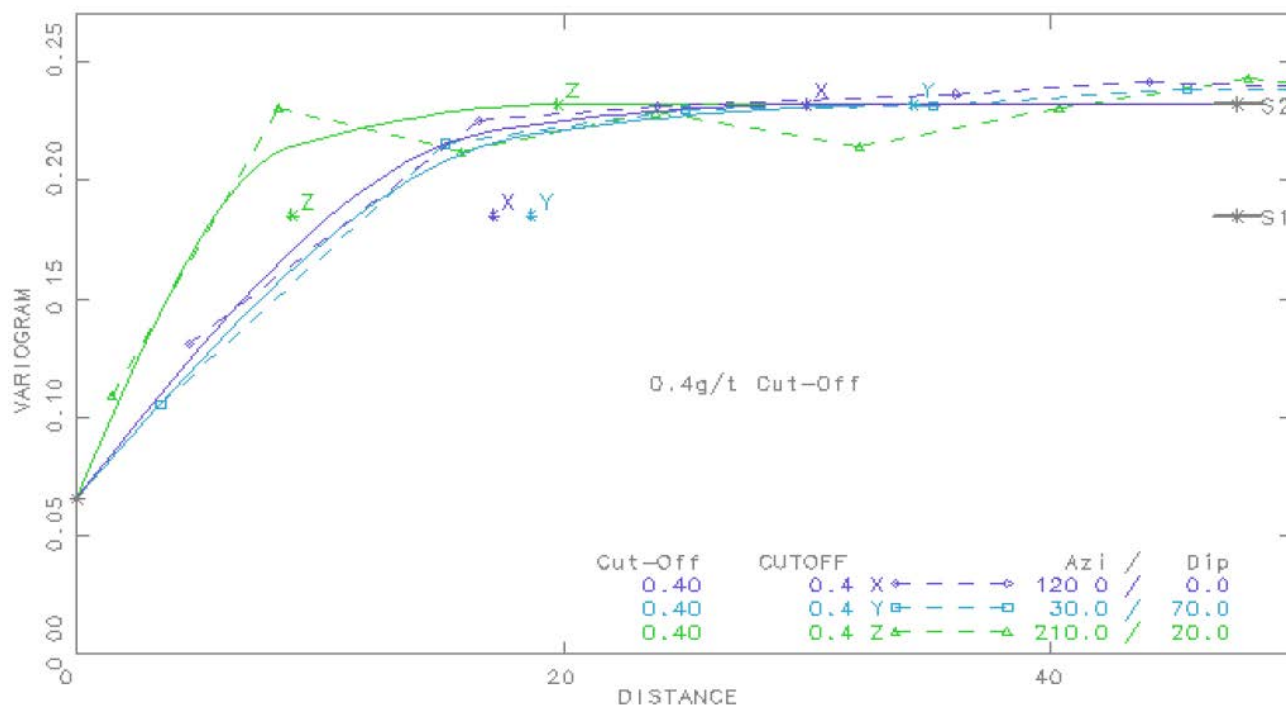


Рисунок 2.25 – Вариограммы индикаторов для месторождения Павлик при бортовом содержании 0,4г/т

Вариограммы построены по простиранию, падению и мощности (зеленый цвет). Пределы корреляции для направлений падения и простирания примерно соответствуют друг другу.

Предел корреляции для них составляет около 25 м. Относительно этих направлений форму рудных тел можно считать изотропной.

С теоретических позиций предел корреляции характеризует средний размер рудных тел по данным направлениям. При оконтуривании по разным кондициям размеры рудных тел будут также изменяться. Такое положение иллюстрируется графиками индикаторных вариограмм для бортового содержания 0,8 г/т, приведенными на рисунке 2.26.

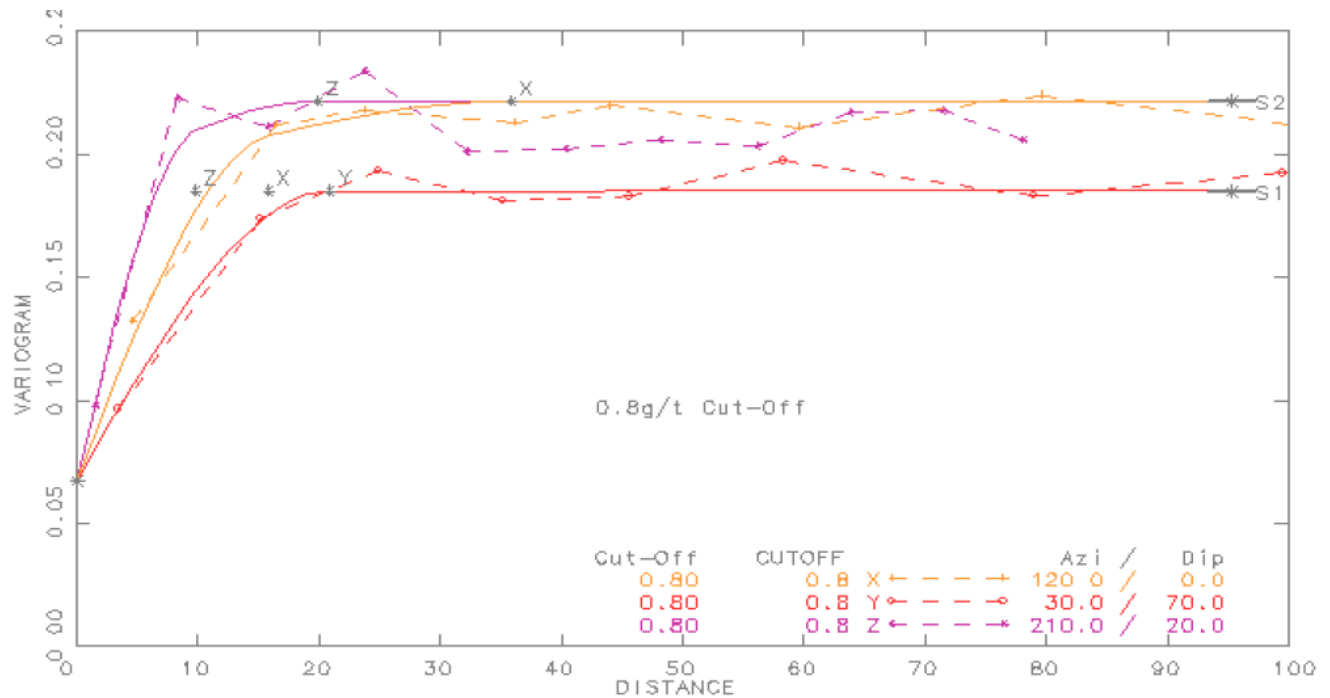


Рисунок 2.26 – Вариограммы индикаторов для месторождения Павлик при бортовом содержании 0,8 г/т

Пределы корреляции по падению и простиранию для бортового содержания 0,8 г/т сокращаются до 20 – 22 м, изменяется также характер вариограмм для направления мощности. На этом же объекте размеры рудных тел определялись также на основе графических построений, они оказались близкими по величине (глава 4, Таблица 4.6).

Блочное моделирование и качество его результатов в значительной мере связаны с учетом геологических особенностей объектов и условий его отработки. Модели могут строиться на разных принципах оконтуривания изучаемых объемов и с использованием различных приемов моделирования. К числу последних относятся: способ интерполяции, размеры блоков, ориентировка поискового эллипсоида и его размеры и анизотропия, учет количества проб по секторам и другие.

В российской практике представления материалов в ГКЗ определены подходы [75], обеспечивающие удовлетворительное соответствие результатов блочного моделирования данным традиционного подсчета запасов. Главным из них является построение каркасов рудных тел по вариантам кондиций.

Основными параметрами модели являются: способ интерполяции содержаний, размеры и ориентировка поискового эллипсоида и размер ячеек (блоков). Интерполяция может производиться с использованием различных процедур. В их числе следует отметить: метод ближайшего соседа (пробы), метод среднего, метод обратных расстояний и геостатистические методы. Наиболее корректным из них считается геостатистический метод, однако возможности его использования во многих случаях ограничены.

В процессе моделирования размеры поискового эллипсоида часто определяют достоверность оцененных запасов. Они могут меняться в зависимости от вида вариограмм от  $1/4$  -  $1/2$  предела корреляции до соответствующей ему величины.

Ориентировка поискового эллипсоида в общем случае должна соответствовать ориентировке основных рудоконтролирующих структур. При моделировании складчатых рудных тел рекомендуется использовать процедуру *unfolding*, сущность которой состоит в предварительном «разгибании» складок, оценке содержаний в ячейках и в обратном приведении модели к исходным координатам.

При наличии в моделируемом объеме рудоконтролирующих структур разной ориентировки используется процедура «динамической анизотропии», при которой поисковый эллипсоид ориентируется в соответствии с предварительно построенными осевыми плоскостями рудных тел или по их внешним границам. Результаты использования «динамической анизотропии» иллюстрируются рисунком 2.27.

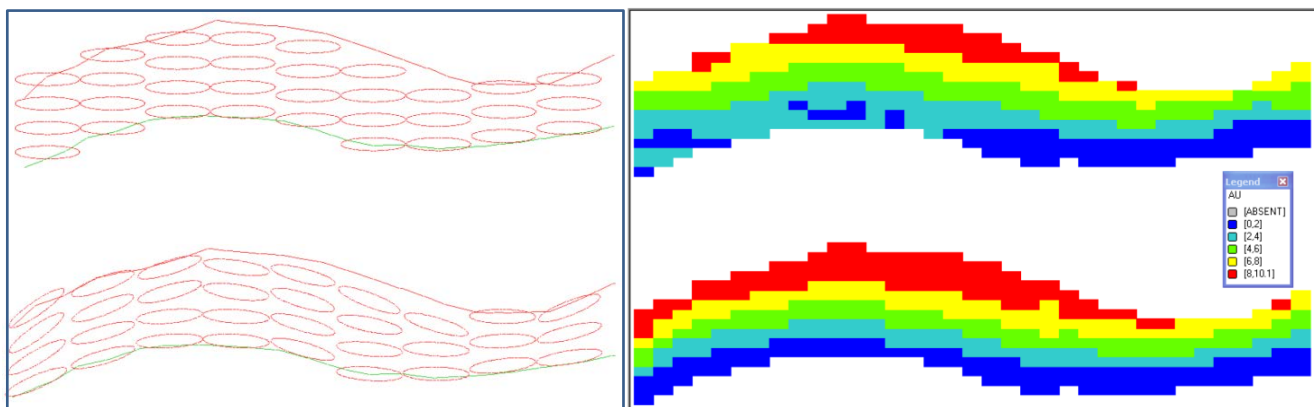


Рисунок 2.27 – Использование метода «динамическая анизотропия»; слева – ориентация эллипсоида без учета и с учетом складчатой структуры, справа – результаты интерполяции.

Размеры элементарных блоков или ячеек модели влияют прежде всего на сохранение «контрастности» оруденения и на степень сглаживания блочной моделью исходных данных опробования. При использовании элементарных блоков разных размеров проявляется действие эффекта «объем - дисперсия». В блоках малого объема, сопоставимых по размерам с площадью влияния исходных данных опробования, влияние соседних замеров сказывается в относительно низкой степени, дисперсия содержаний в блоках соответствует дисперсии исходных данных. При



увеличении размеров ячеек содержания компонента в них выравниваются/сглаживаются, вследствие чего снижается дисперсия признака. Динамика изменения параметров моделей в зависимости от размеров блоков иллюстрируется рисунком 2.28, заимствованным из работы И. Глекена и А. Трумена [98].

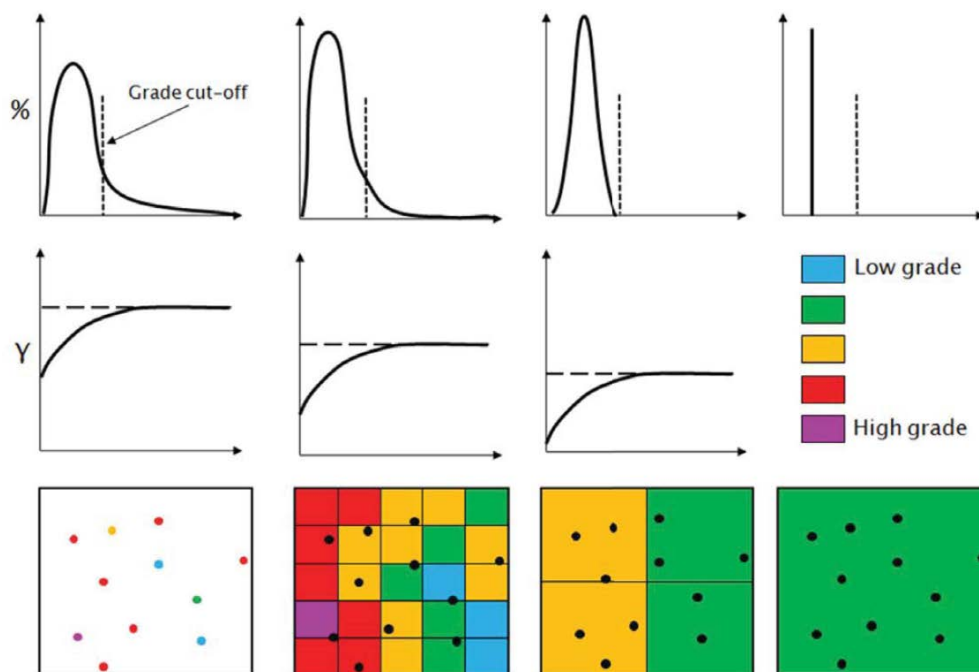


Рисунок 2.28 – Влияние эффекта объем-дисперсия при изменении размера объема селекции от пробы (слева) до домена (справа) на оценку запасов и среднего содержания (вверху) и вариограмму (центральный ряд) (I. Glacken and A. Trueman, 2014, [98])

В верхнем ряду рисунка даны гистограммы распределения содержаний по исходным данным (слева) и по блокам разных размеров. По гистограммам видно, что для первых двух вариантов существует возможность оконтуривания относительно богатых руд, отсортированных по величине cut-off-grade. При больших размерах блоков такие руды не выделяются.

Вариограммы, расположенные в среднем ряду, показывают, что при увеличении размеров блоков снижается как общий уровень дисперсии, так и уровень дисперсии самородков.

Размер ячеек определяет также корректность оконтуривания оруденения, что особенно важно на стадии проведения эксплуатационных работ. Влияние размеров блоков (ячеек) на геометризацию оруденения иллюстрирует рисунок 2.29.

По установленным эмпирическим правилам размеры ячеек по падению и простиранию должны соответствовать  $1/4 - 1/2$  шага сети по этим направлениям, по мощности рудных тел этими правилами они не лимитируются.

Одним из требований, установленных в Рекомендациях [75] является соответствие размеров блоков, особенно по мощности, показателям кондиций.

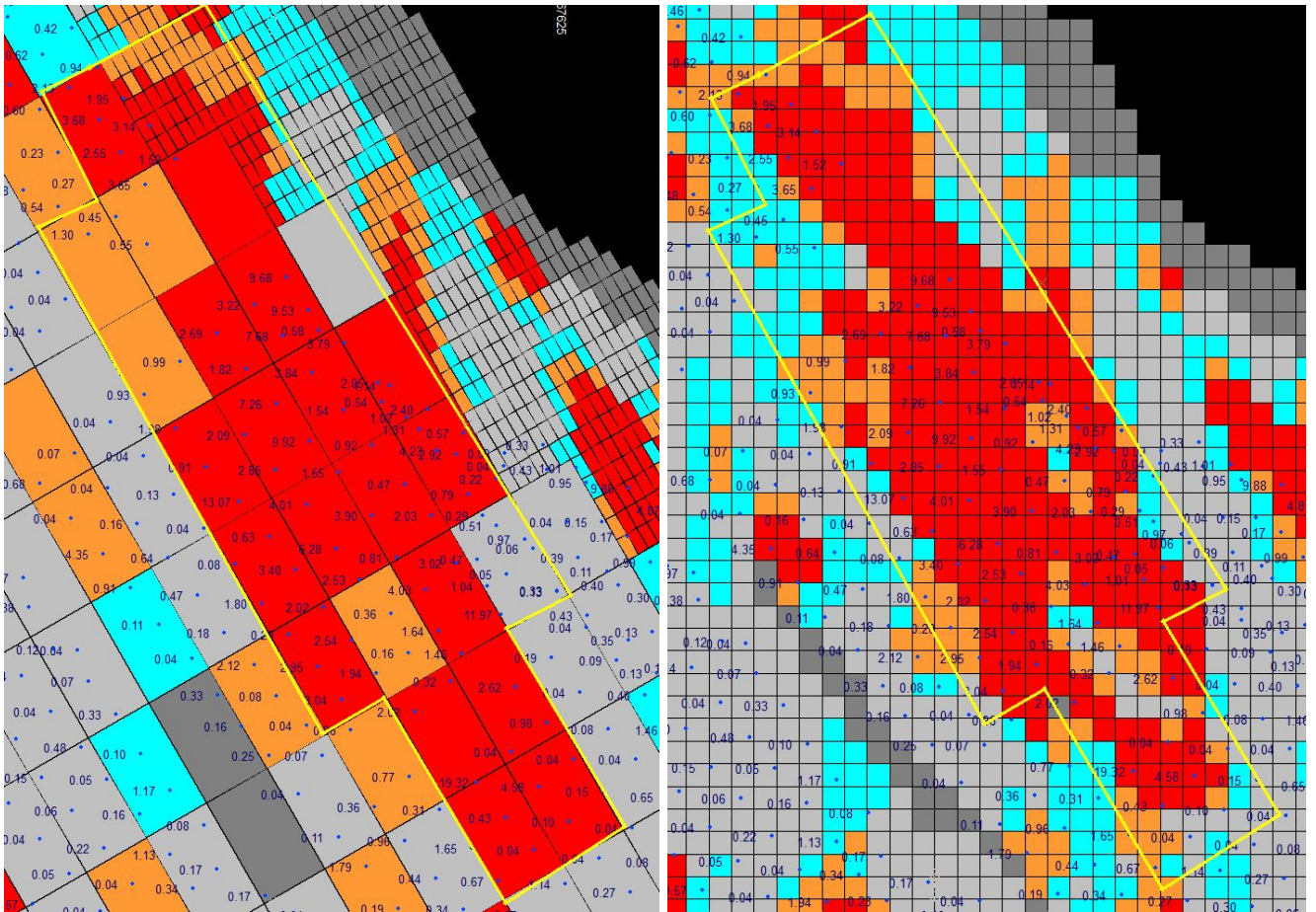


Рисунок 2.29 – Распределение богатой (красное), средней (желтое) и бедной (голубое) по качеству руды по блокам размером  $10 \times 10$  м (слева) и  $2 \times 2$  м (справа) на эксплуатационном уступе

### 2.3 Использование положений фрактальной геометрии при решении задач разведки и оценки месторождений

Теоретические положения фрактальной геометрии, предложенной Б. Мандельбротом [12], в настоящее время широко используются при решении задач многих научных дисциплин: от географии, метеорологии, медицины, биологии, радиотехники, астрономии, гидро- и термодинамики до прикладного декоративного искусства. Современные достижения в изучении дисциплин сданных позиций позволяют заключить, что *фрактальная дробность является одним фундаментальных свойств природных объектов.*

Необходимость и возможность использования принципов фрактального анализа при изучении и описании геологических объектов отмечается в отдельных работах отечественных исследователей [17]. Главным образом, эти работы затрагивают вопросы прогноза и поисков месторождений твердых полезных ископаемых. Для целей разведки и геолого-экономической оценки эти подходы ранее широко не применялись.

Природные геологические, в том числе рудные объекты, относятся к стохастическим фрактальным системам. По Б. Мандельброту «*Фракталом называется структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому*» [63]. Главной количественной

характеристикой фрактального объекта является его размерность, которая в масштабно-инвариантных системах определяется нецелой (дробной) величиной. Размерность, определенная с помощью покрытия множества областями фиксированной формы и размера, математики называют емкостью множества или размерностью Хаусдорфа. Для геологических объектов геометрическая размерность может оцениваться применительно к линии (1D), площади (2D) и объему (3D).

Теоретические основы фрактальной геометрии приложимы к геологическим явлениям, результаты оценки которых зависят от шкалы или базы измерений. В общем случае задача сводится к нахождению размерностей или пропорций, описывающих эту взаимосвязь. Сущность практического использования выявленных закономерностей состоит в возможности прогноза показателей, интересующих исследователя, для любых условий измерений. Ведущей характеристикой при этом анализе является фрактальная размерность объекта.

Соотношение явлений и баз для их измерения, возникающее в ряде ситуаций при изучении геологических объектов, может быть охарактеризовано примерами, отмеченными в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Геологические явления и базы измерений

Дисциплина	Явление	База измерений
геофизика	Число землетрясений	магнитуда
	Кажущееся электр. сопротивление	разнос контактов
геоморфология	Число водотоков на ед. площади	порядок водотока
минералогия	Концентрация кристаллов, зерен, шт/т	размер/масса кристалла
методика разведки ТПИ	Распределение полезного компонента	содержание ПК
	Показатели морфологии рудных тел	длина отрезка, шаг сети
	Параметры оруденения	кондиции, в т.ч. бортовое сод.
металлогения	Число объектов в пределах структуры	масштаб рудных проявлений
география	Длина береговой линии	размер шкалы (м-б карт)

Опыт изучения рудных образований с применением методов фрактальной геометрии в настоящее время практически отсутствует. Не разработаны приемы использования результатов исследований для решения задач разведки и оценки месторождений. Сама постановка этих задач отличается от задач, описанных в специальной литературе [17, 29, 63], в связи с чем некоторые разработки имеют «пионерный», предварительный характер. В данных условиях важно определить объекты исследований и требования к результатам, а также наметить пути решения задач разведки и эксплуатации на основе полученных характеристик фрактальной размерности.

### 2.3.1 Изучение морфологии оруденения на основе принципов фрактальной геометрии

Одной из задач, для решения которой могут быть использованы принципы фрактальной геометрии, является *оценка сложности строения геологического объекта* и, в частности, описания морфологии рудных образований. В рамках этого анализа можно рассматривать

различные зависимости, в том числе зависимость длины периметра рудных образований или их средних размеров по определенному направлению от шага разведочной сети. Кроме того, можно оценивать влияние кондиционных показателей как базы измерений на результаты оконтуривания рудных тел и их параметры.

Контурные природные объекты, в том числе рудные образования, относятся к стохастическим фрактальным системам. Главной количественной характеристикой фрактального объекта является его размерность, которая характеризует зависимость длины линии ( $L(\delta)$ ) от шкалы измерений -  $\delta$  (базы):

$$L(\delta) = \delta^{1-D} \quad (2.11)$$

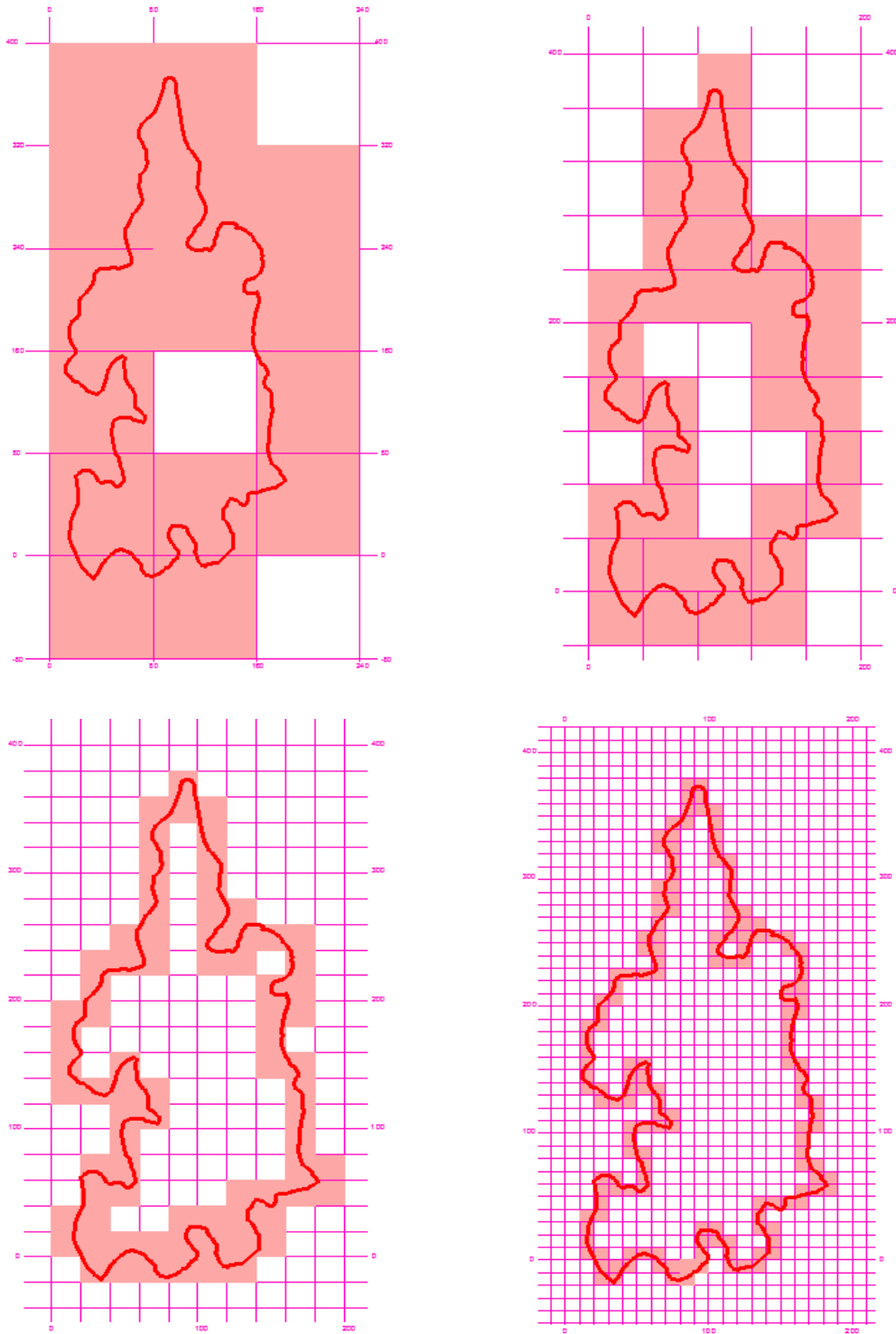
Размерность ( $D$ ), определенная с помощью покрытия множества областями фиксированной формы и размера, называется емкостью множества или размерностью Хаусдорфа.

Исходными данными для определения размерности рудных образований в 2-D пространстве являются разрезы, планы и проекции, на которых установлена их форма. С теоретических позиций размер шкалы измерений – базы может быть бесконечно малым, что предопределяет бесконечную длину линии  $L(\delta)$ .

Реальные природные объекты не проявляют фрактальность в математическом смысле, а имеют лишь элементы фрактальной структуры. Определенные их свойства, например, длина границ рудных тел, не являются бесконечными. В связи с этим масштаб измерений следует ограничивать определенными рамками. В качестве таких ограничений принимаются возможности горной технологии по селективной выемке руды, для подземных горных работ они составляют минимально 0,8 - 1 м, а для открытых горных работ – 2 - 6 м.

Исследования фрактальных характеристик были проведены на золоторудных месторождениях различных морфологических типов, для которых имелись данные оконтуривания рудных тел по предельно плотной сети наблюдений – сети сопровождающей эксплуатационной разведки (СЭР). Параметры сети зависели от условий отработки и применяемых для оконтуривания оруденения кондиций. Рассматривались варианты изучения контуров в разрезах, на планах и на проекциях. Кроме того, оценивалось влияние кондиционных показателей на величину фрактальной размерности.

Наиболее простым и эффективным приемом оценки размерности  $D$  на плоскости является процедура box-counting [29, 58, 61]. Она состоит в неоднократном наложении квадратной сетки с определенной длиной стороны на объект исследований (Рис. 2.30). Процедура часто применяется для оценки размерности на плоскости, хотя легко обобщается на пространство любой размерности.



*Рисунок 2.30 – Примеры наложения на рудное тело сеток с размером ячеек 80, 40, 20 и 10 м*

Фрактальная размерность  $D$  определяется путем покрытия исследуемого объекта множеством ячеек фиксированной формы и размера, называемой емкостью множества или размерностью Хаусдорфа. Например, фрактальная размерность  $D$  для длины контакта «руда – порода» рудного тела определяется следующим образом:

– на план рудного тела накладываются не менее четырех вариантов сетки из квадратных ячеек (базы) со стороной 80, 40, 20 и 10 м (Рис. 2.30);

– подсчитывается количество «заполненных» ячеек, в пределах которых отмечено наличие контура рудного тела, результаты заносятся в таблицу 2.5;

– берутся логарифмы (как правило, натуральные) чисел, определяющих размеры сторон ячеек и количество ячеек с наличием контура рудного тела, данные заносятся в таблицу 2.5;

Таблица 2.5 – Результаты расчетов исходных данных для определения фрактальной размерности

Шкала измерений (длина стороны ячейки)	натуральный логарифм длины стороны ячейки	Количество ячеек с контуром рудного тела	натуральный логарифм количества ячеек с контуром рудного тела
80	4,382	16	2,773
40	3,689	34	3,526
20	2,996	78	4,357
10	2,303	166	5,112
5	1,609	365	5,900

– строится в билигарифмическом масштабе линейный график зависимости количества «заполненных» ячеек от размера их стороны (Рисунок 2.31);

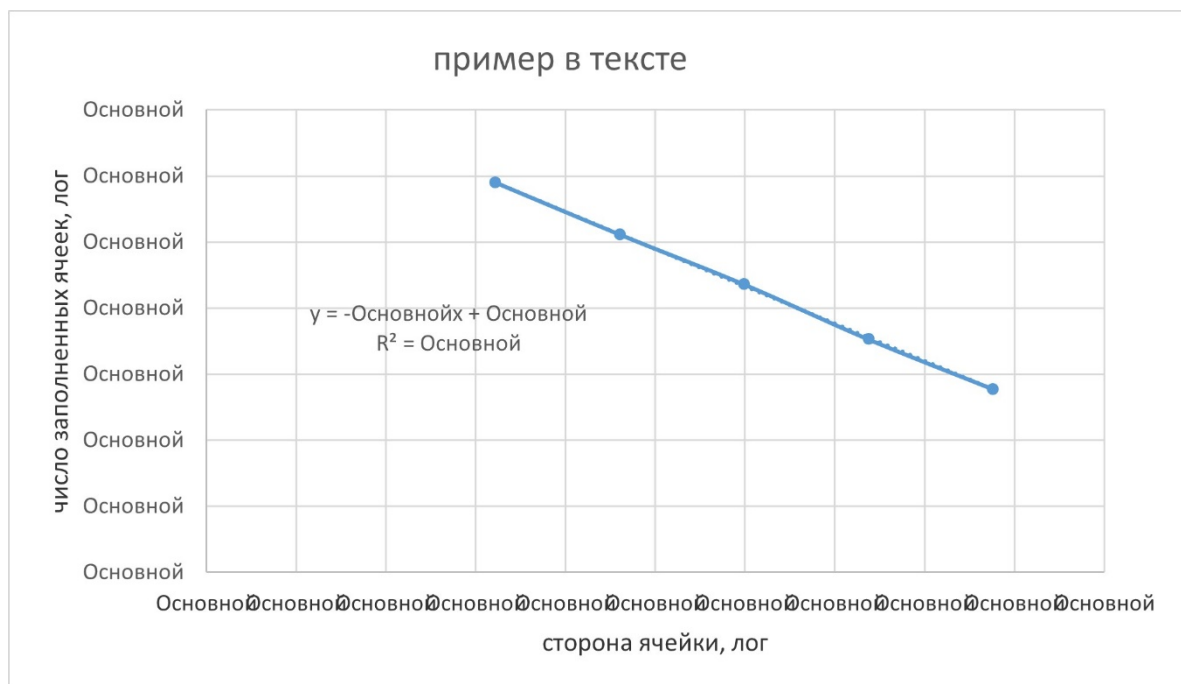


Рисунок 2.31 – Зависимость количества «заполненных» ячеек от размера их стороны

– определяется тангенс угла наклона графика, являющийся фрактальной размерностью  $D$  (метрикой Хаусдорфа); на представленном рисунке 2.31 она характеризуется коэффициентом в уравнении тренда, взятым с обратным знаком и составляет 1,131.

Определения фрактальной размерности для ряда золоторудных и других видов месторождений выполнены на основе данных эксплуатационного опробования по планам, разрезам и проекциям рудных тел. Исследования проведены для объектов разных

морфологических типов. Результаты изучения фрактальной размерности месторождений приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Фрактальная размерность различных морфологических типов месторождений

№№	Морфологический тип	Месторождение	Объект	D
1	штокверк	Павлик	планы гор-тов	1,46-1,52
2	штокверк	Мурун-Тау	проекция залежей	1,457
3	штокверк	Жирекен	планы гор-тов	1,38-1,42
4	штокверк	Белая Гора	планы гор-тов	1,41-1,44
5	штокверк	Березитовое	планы гор-тов	1,415-1,47
6	штокверк	Павлик р-з 16	разрез	1,443
7	штокверк	Павлик р-з 17	разрез	1,436
8	штокверк	Павлик р-з 19	разрез	1,374
9	минерализованная зона	Березняковское	планы гор-тов	1,36-1,43
10	минерализованная зона	Албазино	планы гор-тов	1,27-1,32
11	минерализованная зона	Албазино	разрезы	1,22-1,43
12	минерализованная зона	Березняковское	планы гор-тов	1,36-1,48
13	минерализованная зона	Александровское	план гор-та	1,384
14	минерализованная зона	Вернинское	план гор-та	1,396
15	минерализованная зона	Наталка	план гор-та	1,316
16	минерализованная зона	Дражное	разрез	1,341
17	залежь	Боковое	планы гор-тов	1,16-1,32
18	залежь	Ватутинское	план гор-та	1,351
19	залежь	Многовершинное	план горизонта	1,324
20	жилообразное тело	Майское рт1	проекции	1,466
21	жилообразное тело	Майское рт1 фр	проекции	1,463
22	жилообразное тело	Майское рт2	проекции	1,478
23	жилы	Дарасун	планы гор-тов	1,16-1,18
24	жилы	Дарасун	проекции	1,152-1,21
25	жилы	Каральвеем	проекции	1,121-1,18
26	жила	Первенец к	планы гор-тов	1,252
27	жила	Первенец з	планы гор-тов	1,234
28	жила	Двойное 37/3	проекции	1,469
29	жила	Двойное 37/4	проекции	1,439

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы о величине показателя фрактальной размерности D для рудных объектов разных морфологических типов:

- максимально высокие значения фрактальной размерности характерны для штокверковых месторождений, для практических расчетов по аналогии могут быть приняты значения D от 1,4 до 1,5;

- для минерализованных зон величина фрактальной размерности составляет 1,2 – 1,4, редко выше; среднее значение для этого типа объектов можно принять равным 1,3;

- залежи прожилково-вкрапленных руд характеризуются величиной  $D = 1,16 - 1,32$ , в среднем – 1,25;

- жилы и жилообразные тела по величине показателя фрактальной размерности можно предварительно разделить на две группы: простые со значениями D от 1,15 до 1,25 и сложные со



значениями  $D$  от 1,4 до 1,48. Жилы сложного строения характеризуются наличием рудных столбов и гнездовых концентраций, обусловленных перераспределением полезного компонента в осложняющих структурах (Рисунок 2.32).

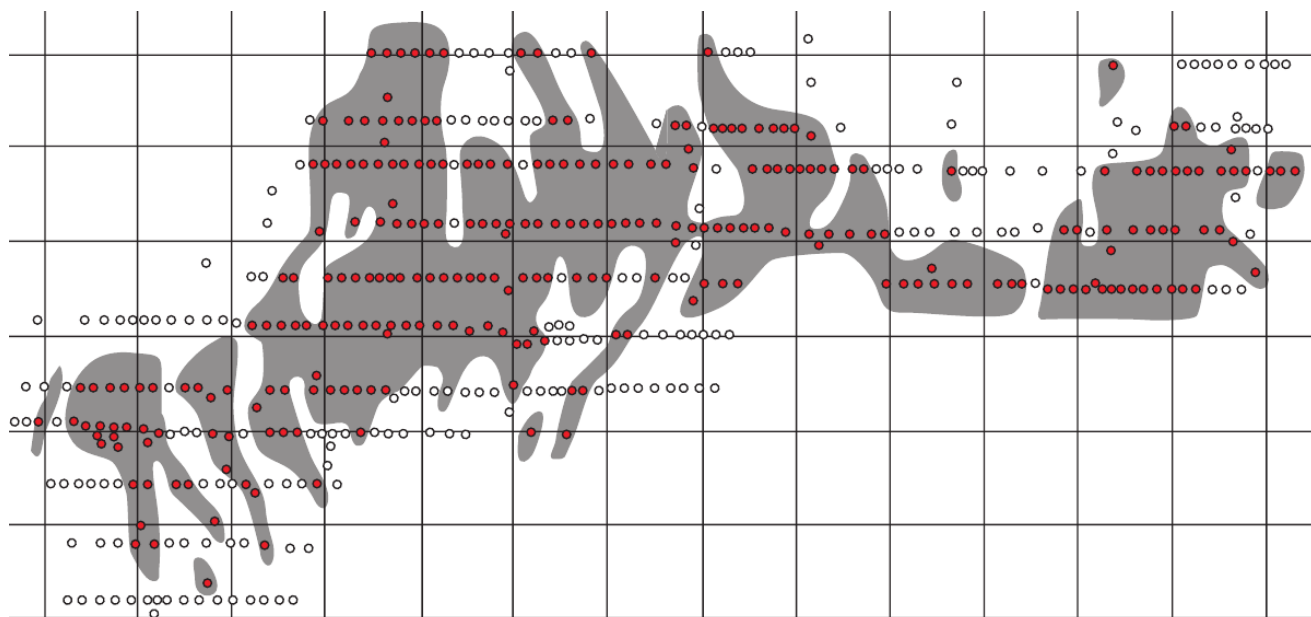


Рисунок 2.32 – Морфология оруденения в проекции на вертикальную плоскость по жиле сложного строения (м-ние Двойное)

На ряде рудных объектов изучалось влияние уровня бортового содержания на их фрактальные характеристики. Исследования проводились на планах опробования горизонтов горных работ и на детальном разрезе месторождений разных морфологических типов, для жильных месторождений использовались проекции рудных тел. В числе изученных объектов месторождения Павлик, Березняковское, Майское, Боковое, Первенец, Двойное и другие.

Влияние кондиций на величину фрактальной размерности и морфологические характеристики оруденения можно показать на примере Березняковского золоторудного месторождения (Рисунок 2.33), где на плане эксплуатационного горизонта 205 м показаны границы рудных тел, выделенных при разном уровне бортовых содержаний.

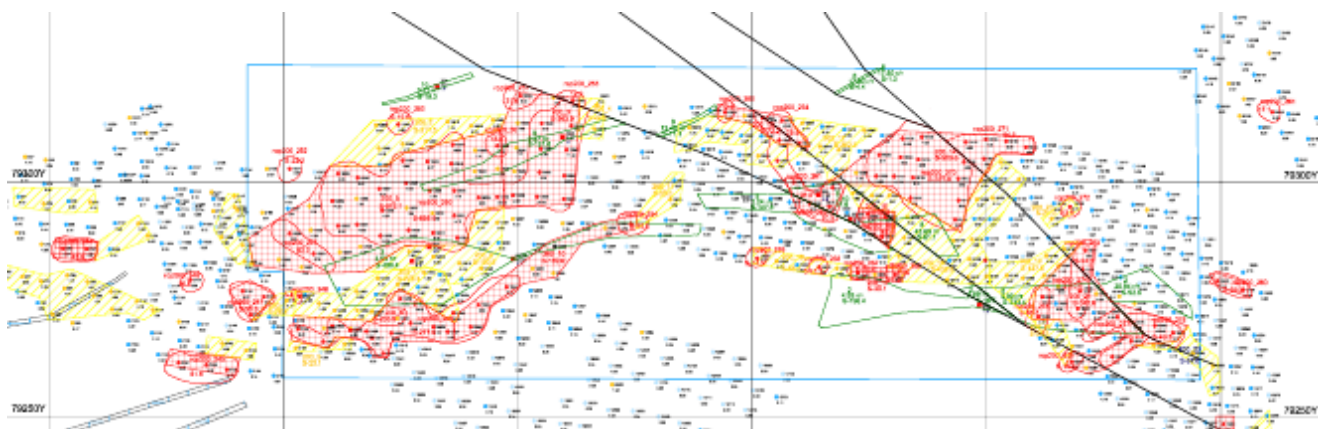
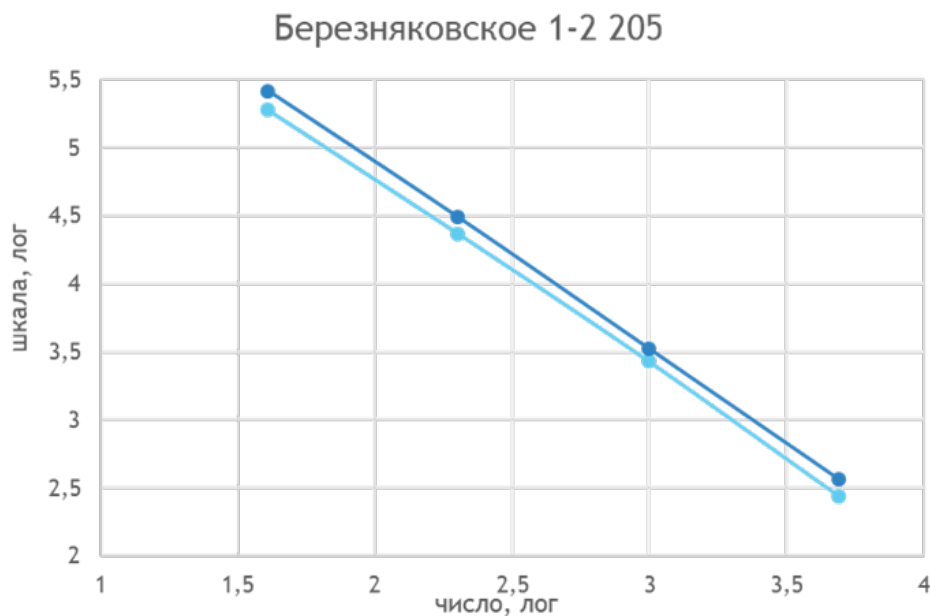


Рисунок 2.33 – План горизонта 205 м с контурами рудных тел, выделенных по бортовому содержанию 1 г/т (красное) и 0,5г/т (желтое)



Для контуров рудных тел при разных бортовых содержаниях выполнены исследования по определению их фрактальной размерности. Графики определения фрактальной размерности по вариантам бортовых содержаний для Березняковского месторождения представлены на рисунке 2.34.



*Рисунок 2.34 – Графики определения фрактальной размерности по месторождению Березняковское для разных бортовых содержаний*

Наклон линии зависимости, по которой определяется мера Хаусдорфа, при изменении бортового содержания сохраняется. Аналогичный характер поведения графиков отмечается и для других исследованных месторождений.

На основе принципов фрактальной геометрии можно исследовать форму плоских фигур, к которым относятся рудные тела, изображаемые на разрезах и в сечениях. Как было показано в разделе 2.2, основными характеристиками, получаемыми в этом случае при морфометрическом анализе, являются: площадь, средняя длина и ширина (мощность). В качестве дополнительных показателей в литературных источниках [8, 85] предлагалось рассматривать коэффициент анизотропии и контурный модуль  $P/S$  – отношение периметра рудного тела  $P$  к его площади  $S$ . Последний показатель в условиях «фрактальности» контура является нестабильным, его величина зависит от базы  $b$ , при которой проводятся измерения.

Для характеристики замкнутых кривых предложен [29] показатель  $\rho$ , величина которого постоянна для семейств объектов («островов») одинаковой формы:  $\rho = P/\sqrt{S}$ .

Сходная величина этого показателя получила название «краевой индекс»:  $\alpha_{EI} = P/2\sqrt{\pi S}$ ; для круга любого размера он равен 1, а для квадрата – 1,29.

Величина отмеченных показателей для фрактальных подобных фигур также не является постоянной. Как показал Мандельброт [63], для них отношение  $\rho$  необходимо заменить следующей модификацией:

$$\rho_D = [L(\acute{o})]^{1/D} / [S(\acute{o})]^{0.5} \quad (2.12)$$

В случае подобия объектов величина  $\rho_D$  не зависит от размеров рудного тела, но определяется выбором эталона длины  $\acute{o}$ . Подобие формы рудных тел в пределах одного месторождения позволяет говорить также о сохранении взаимного соответствия их морфологических характеристик (истинной средней длины, мощности) при изменении площади. В свою очередь это дает возможность оценивать величину ошибок геометризации для частей месторождения, представленных телами определенного размера.

В процессе исследований установлены следующие свойства фрактальной размерности:

- величина фрактальной размерности  $D$  для конкретного месторождения практически не зависит от объекта измерений: плана, разреза, проекции;
- величина  $D$  может быть определена с достаточной надежностью по отдельным участкам (фрагментам) рудных образований, что подтверждается сравнением данных по месторождению Майское: рудное тело 1 и фрагмент рудного тела (Таблица 2.6);
- фрактальная размерность  $D$  не зависит от величины бортового содержания, использованного для оконтуривания рудного тела, что позволяет однозначно характеризовать объект по данному показателю.

Одним из следствий установленных свойств природных объектов с позиций фрактальной геометрии является сохранение подобия морфологических особенностей объекта при рассмотрении его в различных масштабах. Это означает, что сохраняется и соотношение размеров объектов разных масштабных уровней, а также их анизотропия. Например, следует ожидать, что соотношение числа месторождений и рудопроявлений разного масштаба в пределах рудного района или поля соответствует соотношению числа рудных тел и запасов в них руды. Иными словами, крупное месторождений не может состоять из совокупности только мелких рудных тел, поскольку при этом нарушается принцип пропорциональности. Отклонения от этого правила возможны только в случае мультифрактальности, то есть наложении на исходный объект других процессов, приводящих к существенному перераспределению полезного компонента или к нарушению сплошности сформированных рудных образований.

С точки зрения задач разведки самоподобие рудных образований определяет их важное свойство, которое всегда интуитивно предполагалось исследователями, – морфология минеральных зон, рудных залежей и рудных тел соответствует друг другу, меняется только масштаб измерений. Это обстоятельство позволяет на ранних стадиях, изучая образования

низких масштабных на ранних стадиях работ, предполагать основные черты морфологии образований более высоких уровней: рудных тел и рудных столбов.

Таким образом, отнесение месторождения к определенному классу крупности позволяет осуществлять выбор параметров разведочной сети, обеспечивающих достаточную изученность рудных тел и их параметров.

### **2.3.2 Фрактальная геометрия при изучении свойств месторождений**

В рамках анализа морфологических особенностей оруденения рассматривались зависимости длины периметра рудных образований или их средних размеров по определенному направлению от шага разведочной сети. Вместе с тем положения фрактальной геометрии позволяют проводить анализ других показателей оруденения и математически описывать соотношения между ними.

Например, известно, что по результатам поисков и разведочных работ в пределах отдельных регионов выявляются тысячи аномалий, сотни точек минерализации, десятки проявлений и единичные месторождения. Эта особенность была замечена различными исследователями достаточно давно [17, 31, 43]. Для описания соответствия между этими проявлениями и их количеством предлагались различные зависимости, в числе которых можно упомянуть известный «закон Ципфа». Такие зависимости могут строиться в соответствии с принципами фрактальной геометрии и использоваться для оценки перспективности территорий. Размерность данного явления определяется по графикам, также построенным в билогарифмическом масштабе.

Наличие подобия или пропорциональности, вытекающих из основных положений теории фракталов, выражается в определенном соотношении между бортовыми содержаниями и другими характеристиками рудных объектов: запасами руды, средними содержаниями и запасами полезного компонента. Математическое описание этих соотношений может использоваться при повариантном подсчете запасов.

Для иллюстрации этих взаимосвязей использованы данные публичной отчетности о запасах по золоторудному месторождению Сонгджягу (КНР) [107], в основу которых положены результаты блочного моделирования. На рисунке 2.35 показана зависимость между средними содержаниями золота и граничными лимитами (cut-off-grade).

Зависимость среднего содержания золота от бортового, выраженная в натуральных значениях, не соответствует линейной и требует более сложного выражения для ее описания.

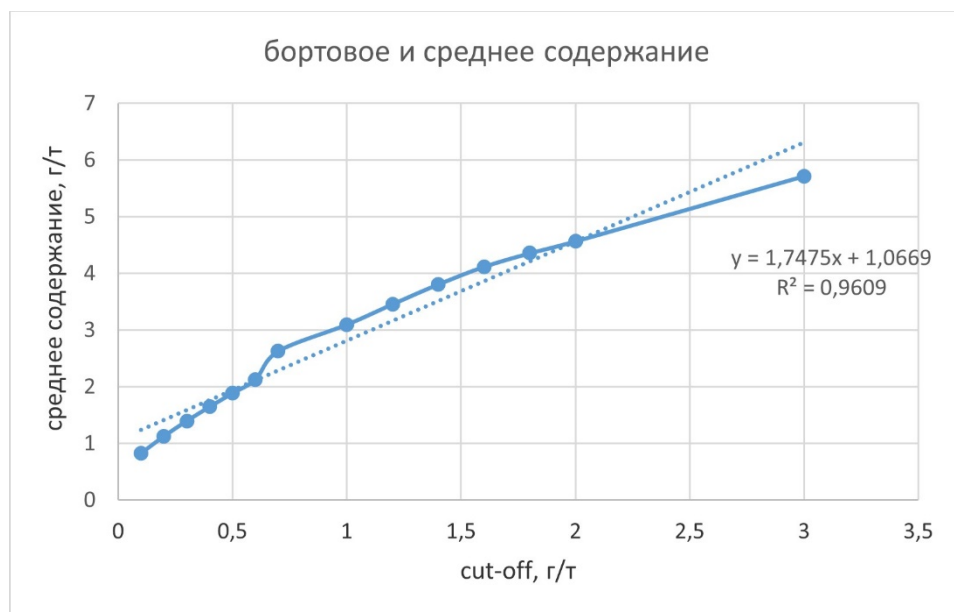


Рисунок 2.35 – Зависимость среднего содержания золота от уровня cut-off-grade в натуральном масштабе

Анализ связи этих параметров проведен с учетом принципов фрактальной геометрии (Рисунок 2.36).

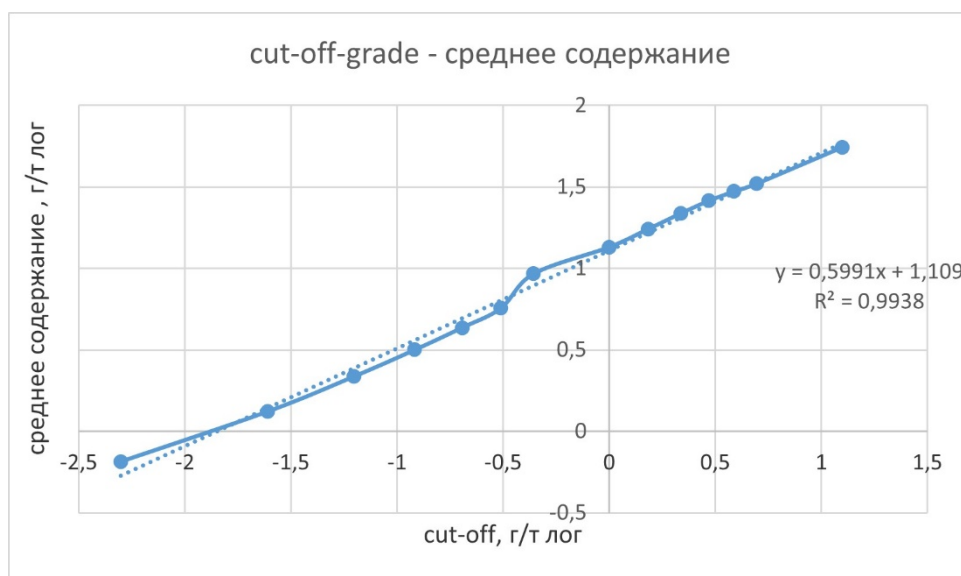


Рисунок 2.36 – Зависимость среднего содержания золота от уровня cut-off-grade в логарифмическом масштабе

Взаимосвязь, выраженная в билогарифмическом масштабе, достаточно хорошо описывается линейным уравнением. В натуральных значениях она будет иметь вид:

$$C_{\text{ср}} = 3,03 * C_6^{0,6} \quad (2.13)$$

где  $C_{\text{ср}}$  – среднее содержание, г/т,

$C_6$  – бортное (cut-off-grade) содержание, г/т.

Полученная зависимость характеризует данные блочного моделирования, где для оконтуривания используется уровень cut-off-grade. На отечественных месторождениях

оконтуривание производится по кондициям, предусматривающим применение, кроме бортового содержания, требования к минимальной мощности рудного тела и к максимальной мощности прослоев пустых пород.

С целью оценки влияния фактора кондиций на установленную зависимость был построен график такого же типа для месторождения Урях (Рисунок 2.37).

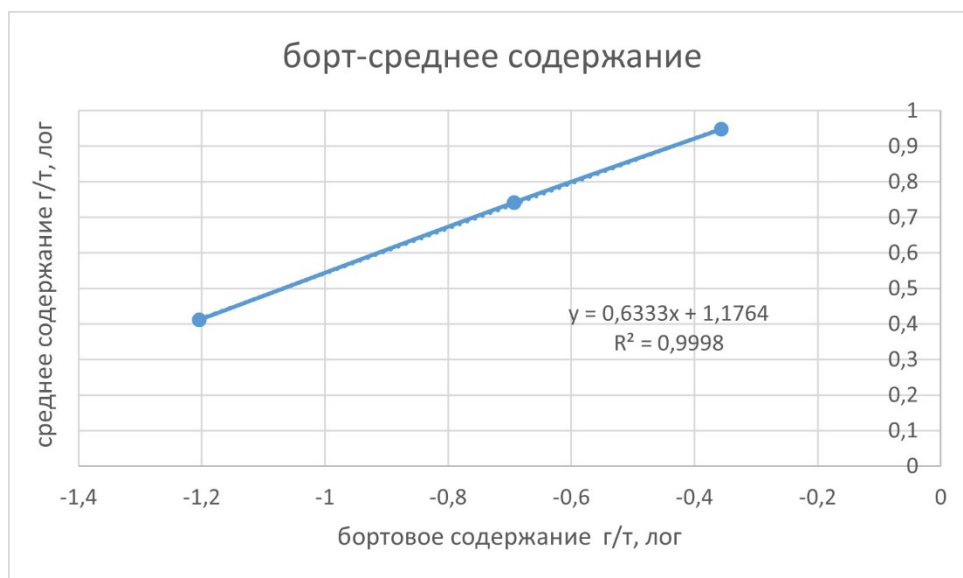


Рисунок 2.37 – Зависимость среднего содержания золота от бортового (м-ние Урях)

Видно, что зависимость, выраженная в логарифмическом масштабе, также хорошо описывается линейным уравнением при сходных значениях его коэффициентов. В натуральных значениях зависимость будет иметь вид:

$$C_{\text{ср}} = 3,23 * C_{\text{б}}^{0,63} \quad (2.14)$$

Изменение коэффициентов вероятнее всего связано с влиянием требований кондиций к мощности тела и пустых прослоев.

На принципах фрактальной геометрии для месторождения Сонгджягу (КНР) проанализирована зависимость запасов руды от уровня cut-off-grade (Рисунок 2.38).

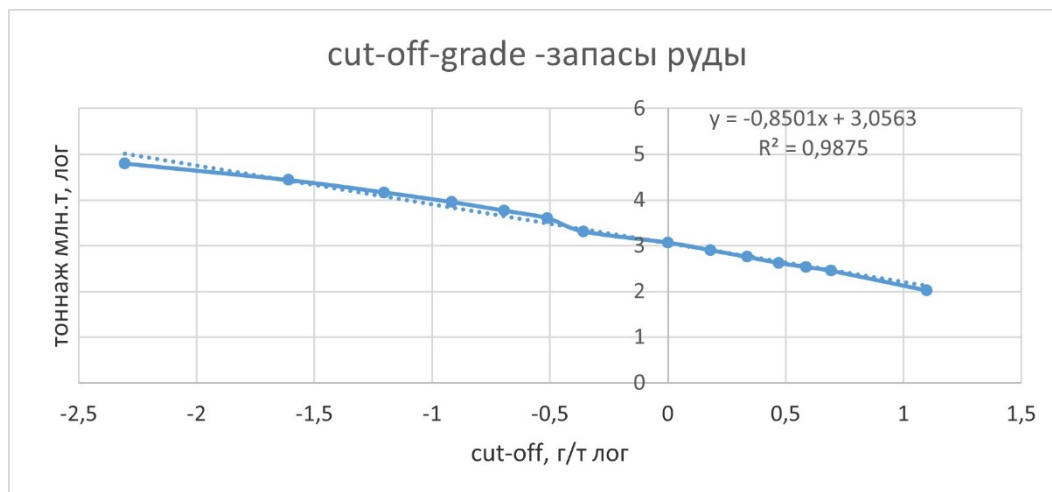


Рисунок 2.38 – Зависимость запасов руды от уровня cut-off-grade золота

С высокой надежностью эта зависимость также описывается линейным уравнением при градиенте/размерности – 0,85.

Аналогичным образом такого типа зависимость проанализирована для месторождения Урях (Рисунок 2.39).

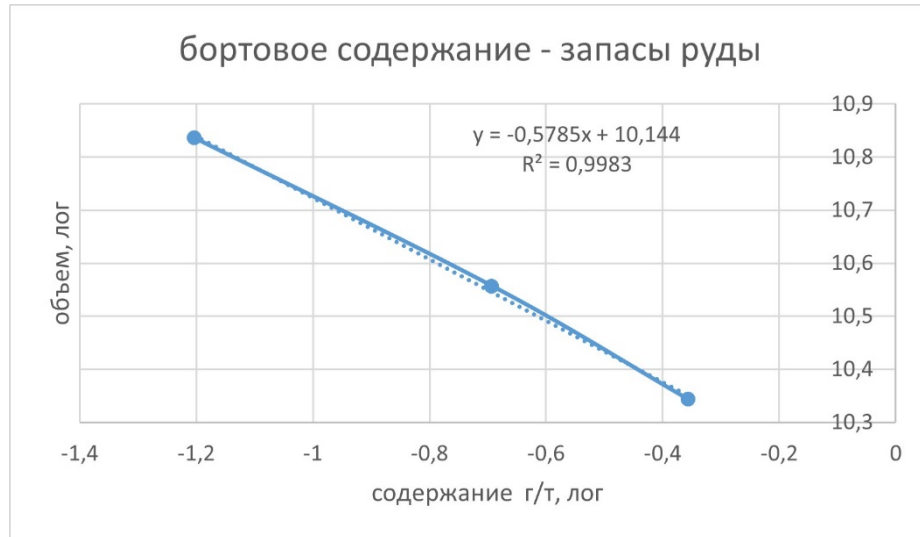


Рисунок 2.39 – Зависимость запасов руды от уровня бортового содержания золота

Расчеты проведены применительно к результатам «геологического» анализа кондиций, где рассматриваются геологоразведочные параметры, полученные по рудным интервалам. В качестве аналога запасов руды рассматривается изменение суммарной мощности рудных интервалов, выделенных по соответствующим кондициям.

В данном случае зависимость запасов руды от уровня бортового содержания в логарифмическом масштабе также хорошо описывается линейным уравнением; коэффициент, характеризующий размерность, составил -0,58.

При анализе соотношений геологоразведочных параметров определенный интерес представляет связь средних содержаний компонента и его запасов. Эта взаимозависимость ранее была установлена Э. Ласки [70, 91] и выражалась в виде:

$$C = b + a * \ln Q \quad (2.15)$$

где  $C$  – среднее содержание компонента,  
 $a$  и  $b$  – коэффициенты.

При геолого-экономической оценке месторождения по вариантам кондиций основной интерес представляет прогноз запасов компонента при заданном среднем содержании, удовлетворяющем условиям эффективной отработки. С этих позиций следует описывать зависимость запасов металла от среднего содержания. В этом случае преобразованное уравнение Ласки будет иметь вид:

$$\ln Q = p * C - h \quad (2.16)$$

где  $p$  и  $h$  – коэффициенты.

Проверка соответствия этого уравнения фактическим данным выполнена по результатам оценки запасов месторождения Сонгджягу (КНР), в графическом виде она представлена на рисунке 2.40.

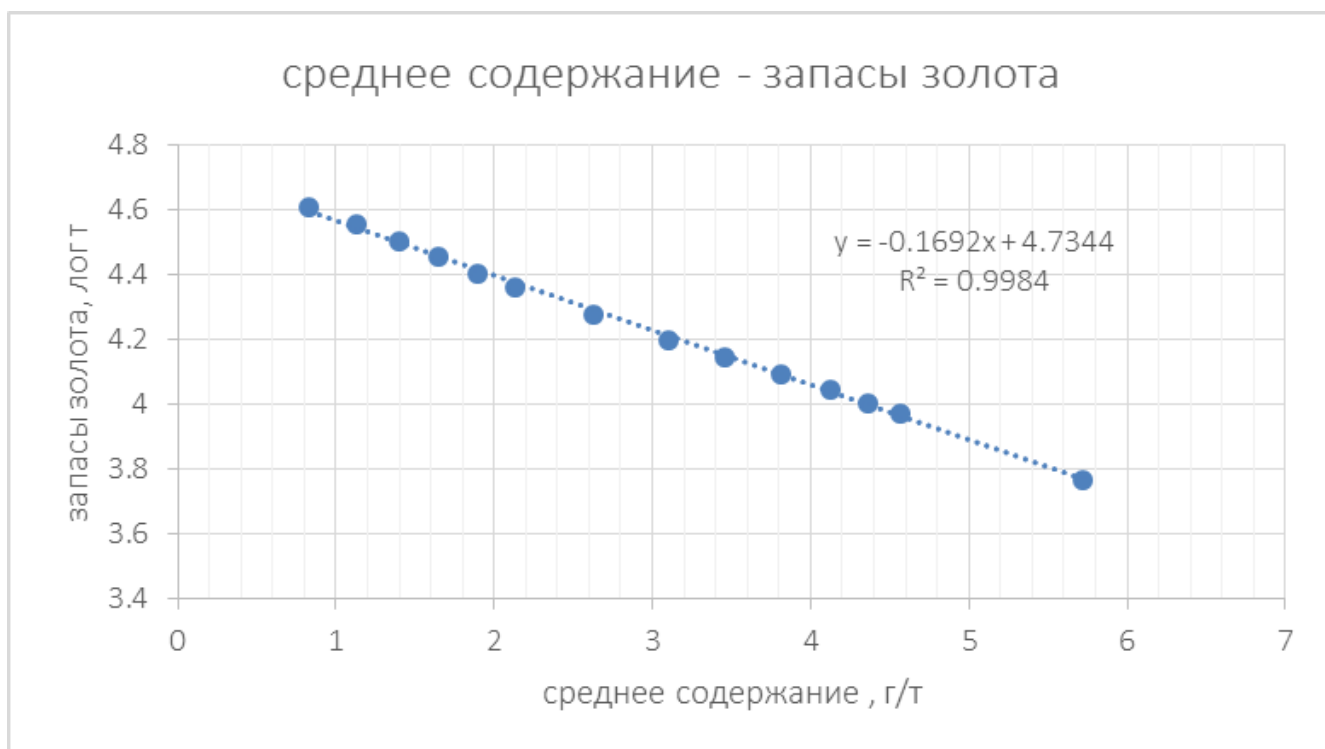


Рисунок 2.40 – Зависимость среднее содержание – запасы золота, месторождение Сонгджягу (КНР)

Коэффициент  $p$  (показатель размерности) равен  $-0.169$ ; коэффициент  $h$ , характеризующий общий масштаб полезной минерализации, равен  $-4.73$ .

В качестве примера, характеризующего возможности математического описания взаимосвязей геологоразведочных параметров, взяты также результаты повариантного подсчета запасов для одного из золоторудных месторождений. Варианты кондиций включали бортовое содержание  $0.4, 0.6, 0.8$  и  $1.0$  г/т при сочетаниях минимальной мощности и пустого прослоя  $1 \times 3, 3 \times 3$  и  $5 \times 5$  м. Варианты показателей мощности в сочетании с бортовыми содержаниями также следует рассматривать как изменение базы измерений. Для данного объекта построены графики зависимости запасов золота от бортового содержания при разных вариантах мощности. Итоги расчетов в виде графиков отражены на рисунке 2.41.

Зависимости вполне удовлетворительно описываются линейными уравнениями, которые имеют разную размерность – от  $-0,214$  до  $-0,339$ . Понятно, что некоторое различие коэффициентов определяется условиями оконтуривания – кондициями, применяемыми к мощности.

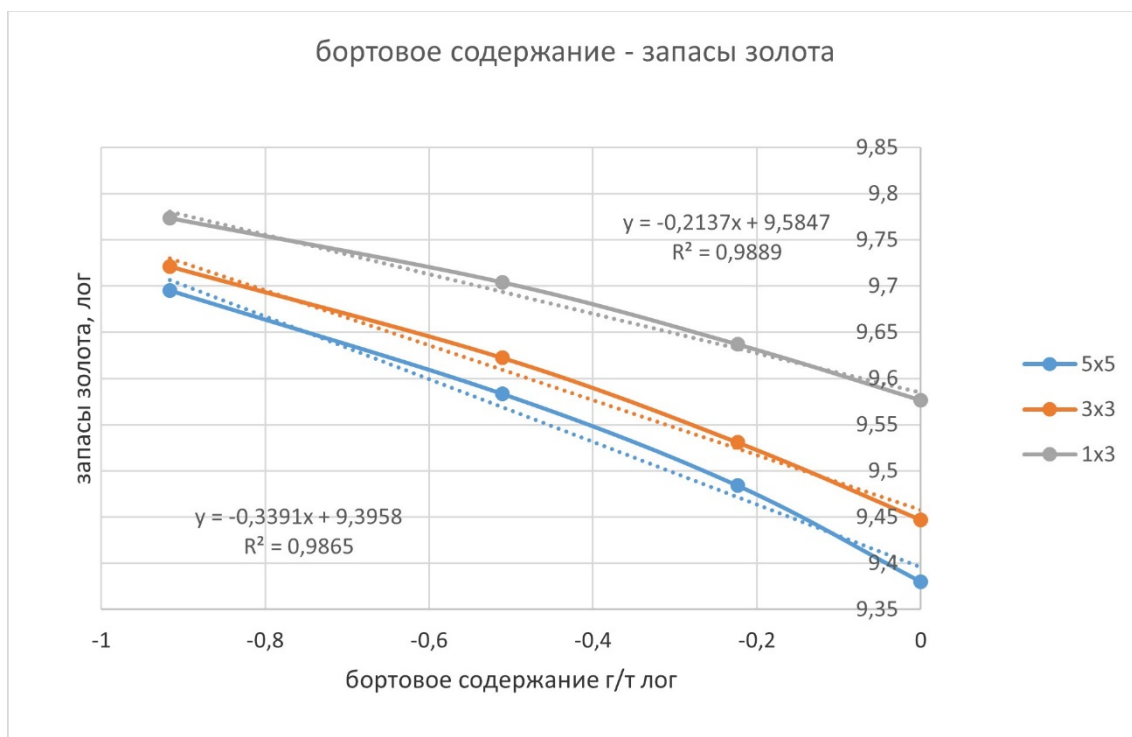


Рисунок 2.41 – Зависимости запасов золота от бортового содержания при разных сочетаниях минимальной мощности рудного тела и мощности пустого прослоя

Влияние этого же фактора проявляется на зависимостях среднее содержание – запасы золота (Рисунок 2.42)

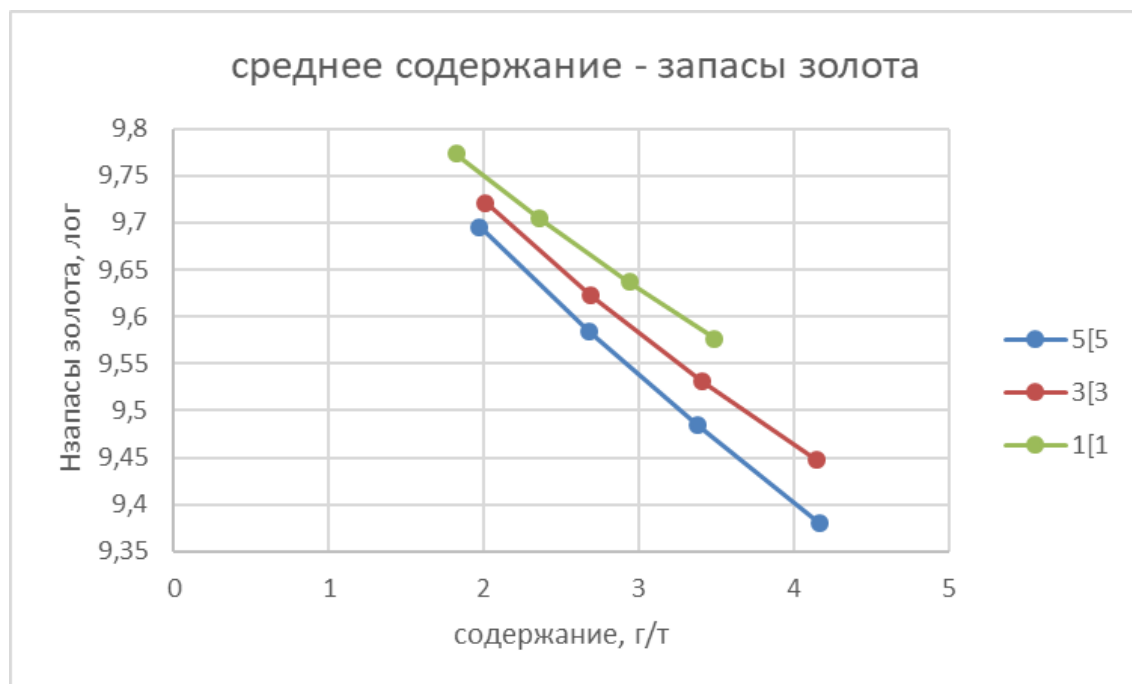


Рисунок 2.42 – Зависимости запасов золота от среднего содержания при разных сочетаниях минимальной мощности рудного тела и мощности пустого прослоя

Интересно отметить, что графики зависимости представляют собой пучок, сходящийся в левой верхней части диаграммы. На рисунке 2.42 видно, что свободные члены уравнений близки между собой. Это положение может рассматриваться как характеристика исходного количества



золота в геохимическом ореоле уровня месторождения, относительно которого происходит его убывание по мере увеличения бортового содержания. Скорость такого убывания зависит также от принятых кондиционных показателей применительно к мощности.

Таким образом, на основе рассмотренных подходов появляется возможность не только математического описания зависимостей, но и сравнения объектов по величине размерности. Это позволяет осуществлять прогноз значений геологоразведочных параметров при показателях кондиций, не участвовавших в исходных расчетах.

Принципы фрактальной геометрии применимы также для коренных месторождений алмазов. Одной из важных задач их изучения является исследование зависимости между количеством кристаллов в 1 т руды и их крупностью или массой. Ее значение определяется недостаточной представительностью разведочных проб для уверенного суждения о наличии алмазов крупных классов, определяющих основную ценность этого вида полезного ископаемого.

Выявление и описание зависимости между концентрацией кристаллов в 1 т руды и их размерностью/крупностью позволяет уточнять оценку алмазности объекта, особенно в условиях ограниченного объема опробования. Исследования, проводимые в этом направлении, показывают, что подходы к выявлению таких зависимостей полностью соответствуют принципам фрактальной геометрии.

Для иллюстрации этого положения на рисунке 2.43 показана зависимость между данными показателями, выраженная в билогарифмическом масштабе. В качестве примера приняты данные по двум трубкам, различающихся прежде всего средними содержаниями в них алмазов.

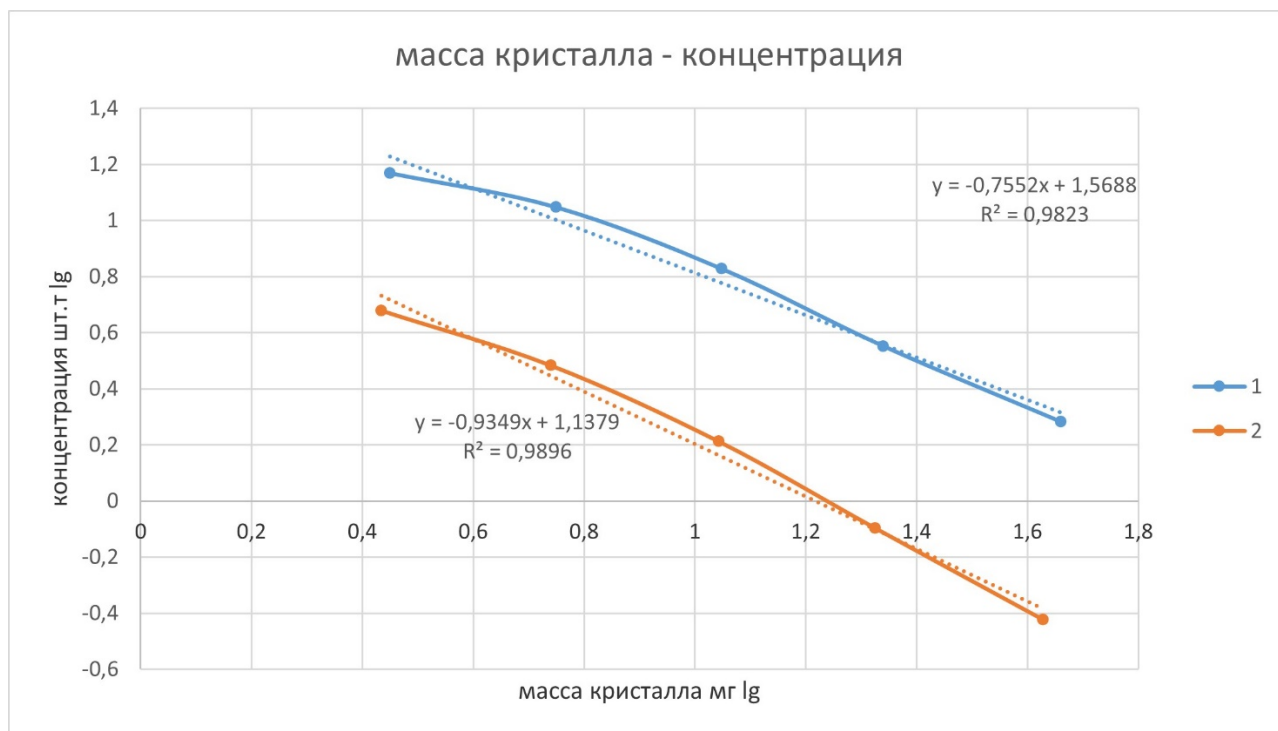


Рисунок 2.43 – Зависимость средняя масса кристаллов – концентрация шт/т по алмазоносным трубкам 1 и 2 (по Зуеву В.М.)

Между средней массой кристаллов в весовых классах и их концентрацией (шт/т), выраженных в логарифмах, имеется почти линейная зависимость с градиентами или размерностью  $-0.755$  и  $-0.935$ . Полученные зависимости позволяют рассчитывать концентрацию алмазов в определенных весовых классах, в том числе в тех, которые не принимали участие в выводе данной зависимости. Для трубки 1 следует ожидать наличие одного кристалла в тонне руды в весовом классе более 100 мг. Для трубки 2 концентрация алмазов в данном весовом классе ничтожно мала.

Следует отметить, что в подобного рода исследованиях могут наблюдаться некоторые отклонения от линейной взаимозависимости логарифмов. Как правило, они связаны с фактором *мультифрактальности* [29], то есть с наложением других явлений и процессов на исследуемые свойства. Применительно к оценке морфологии рудных тел этими факторами могут быть эрозионный срез, тектоника, другие стадии рудоотложения. На результатах изучения гранулярного состава алмазов могут сказываться процессы пострудного растворения мелких алмазов, техногенные нарушения целостности, неполное извлечение при обогащении.

В последнее время при изучении алмазоносных объектов используется опробование на микроалмазы, которое ориентировано на определение фрактальной размерности для предельно мелких классов. Далее с учетом этой размерности можно рассчитать количество кристаллов в более крупных классах и оценить степень алмазоносности объекта. Такие исследования играют особую роль на ранних стадиях геологоразведочных работ, когда возможности отбора проб большого объема ограничены.

Приведенные примеры характеризуют большие возможности математического описания геологических явлений с позиций фрактальной геометрии. Особый интерес они представляют для разведки и оценки месторождений, в настоящее время опыт применения таких подходов практически отсутствует.

### 3 ОЦЕНКА СЛОЖНОСТИ СТРОЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

#### 3.1 Существующие подходы к оценке сложности строения рудных объектов

Определение сложности геологического строения месторождений ТПИ, то есть их типизация по особенностям морфологии оруденения и изменчивости свойств полезного ископаемого является одной из важнейших процедур в отечественной практике ведения ГРР. Ее значение определяется тем, что она тесно связана с выбором параметров разведочной сети и квалификацией запасов. Особую роль эта процедура играет на ранних стадиях работ, когда сведения об объекте весьма ограничены. В этих условиях было предложено пользоваться группировкой месторождений твердых полезных ископаемых, в основу которой положен принцип аналогии.

В настоящее время в российской классификации [37] по сложности строения для всех видов твердых полезных ископаемых выделено четыре группы объектов, которые различаются своими свойствами, в том числе:

- масштабом;
- морфологическим типом рудных образований;
- степенью тектонической нарушенности;
- изменчивостью свойств оруденения.

Основной целью создания классификации являлось обобщение опыта разведки месторождений и разработка подходов к выбору оптимальной геометрии разведочной сети на принципах аналогии.

Для месторождений различных видов минерального сырья, в том числе для золоторудных месторождений (Таблица 3.1) более детальное их разделение на группы представлено в Методических рекомендациях ГКЗ (золото рудное, 2007) [66].

Таблица 3.1 – Группировка золоторудных месторождений по сложности строения

Группа	Месторождения (участки недр)		Количественные показатели		
	Квалификационные признаки	Описание	$K_{руд}$	$V_m$	$V_c$
2	Сложность, размеры рудных тел	Сложное геологическое строение с крупными и средними по размерам телами.	0,7-0,9	40-100	40-100
	Залегание, нарушенность	Нарушенное залегание, неустойчивая мощность и внутреннее строение			
	Изменчивость качества	Невыдержанное качество п.и. и неравномерное распределение основных полезных компонентов			

Продолжение таблицы 3.1

Группа	Месторождения (участки недр)		Количественные показатели		
	Квалификационные признаки	Описание	$K_{руд.}$	$V_m$	$V_c$
3	Сложность, размеры рудных тел	Очень сложного строения со средними и мелкими по размерам рудными телами	0,4- 0,7	100- 150	100- 150
	Залегание, нарушенность	Интенсивно нарушенное залегание, очень изменчивая мощность и внутреннее строение			
	Изменчивость качества	Значительно невыдержанное качество п. и очень неравномерное распределение основных полезных ископаемых.			
4	Сложность, размеры рудных тел	Очень сложного строения с мелкими и средними по размерам телами	< 0,4	> 150	> 150

В таблицу внесены авторские дополнения в соответствии с принятыми в настоящее время количественными показателями сложности строения.

В целом классификация месторождений по сложности строения зарекомендовала себя как эффективный инструмент для определения методики изучения рудных объектов. Его значение представляется особенно важным на ранних стадиях геологоразведочных работ в условиях ограниченности информации.

Основные положения группировки месторождений были разработаны достаточно давно, но в настоящее время они требуют корректировки. Одной из причин совершенствования являются трудности, связанные в том числе, с отсутствием надежных показателей сложности строения объектов. Кроме того, можно отметить, что определенные группы месторождений фактически объединяют в себе объекты, различающиеся не только общим масштабом и размерами рудных образований, но и степенью изменчивости свойств, включая содержания полезных компонентов. В свою очередь это определяет широкий диапазон возможной плотности разведочной сети на этих объектах для получения запасов определенной категории.

Другой причиной можно считать исходную направленность существующей группировки на решение задач плановой экономики. В соответствии с разделением объектов по сложности строения определялось необходимое соотношение запасов разных категорий и соответствующее финансирование геологоразведочных работ. В настоящее время вопросы разведанности месторождения по стадиям работ не регламентируются, однако рудиментом такого регулирования осталось условие отнесения месторождения к определенной группе сложности. В соответствии с ним для разделения объектов по группам необходимо, чтобы требованиям по морфологии и изменчивости параметров удовлетворяло более 70 % балансовых запасов. Таким образом, объектом оценки сложности строения является всё месторождение в целом, без разделения его на какие –либо части.

В настоящее время необходимость такого «грубого» подхода к оценке сложности геологического строения вызывает сомнение. Она не в полной мере согласуется с задачами, решаемыми при проектировании и проведении геологоразведочных работ [55]. В связи с этим возникает необходимость обоснования количественных показателей сложности, которые влияют на выбор параметров разведочной сети и определяют разведанность запасов.

В рамках представленной работы проведены исследования по критическому анализу применимости предложенных ранее характеристик сложности, по выбору наиболее эффективных показателей на основе современных научных достижений, по определению условий их использования.

### 3.2 Используемые количественные показатели при описании морфологии объектов

Существующая Классификация опирается на качественную характеристику используемых в ней свойств оруденения, что вносит неопределенность в принятие решений.

Возможность использования количественных показателей при оценке сложности геологического строения определена в методических документах [37, 66, 72]. В то же время их обоснованность и эффективность требует отдельного критического рассмотрения.

В число показателей, используемых в настоящее время для характеристики сложности геологического строения объекта, включены: коэффициент рудоносности ( $K_p$ ), показатель сложности ( $q$ ) и коэффициент вариации мощности, – они предназначены для описания формы рудных тел (Таблица 3.2). Указаны также предельные значения коэффициентов вариации содержания по пересечениям для месторождений, относимых к различным группам.

Таблица 3.2 – Показатели изменчивости и сложности строения объектов

Группа сложности	Показатели сложности морфологии			Содержания
	$K_p$	$q$	$V_m, \%$	$V_c, \%$
1-ая	0,9-1,0	0,8-0,9	менее 40	менее 40
2-ая	0,7-0,9	0,6-0,8	40-100	40-100
3-я	0,4-0,7	0,4-0,6	100-150	100-150
4-ая	менее 0,4	менее 0,4	более 150	более 150

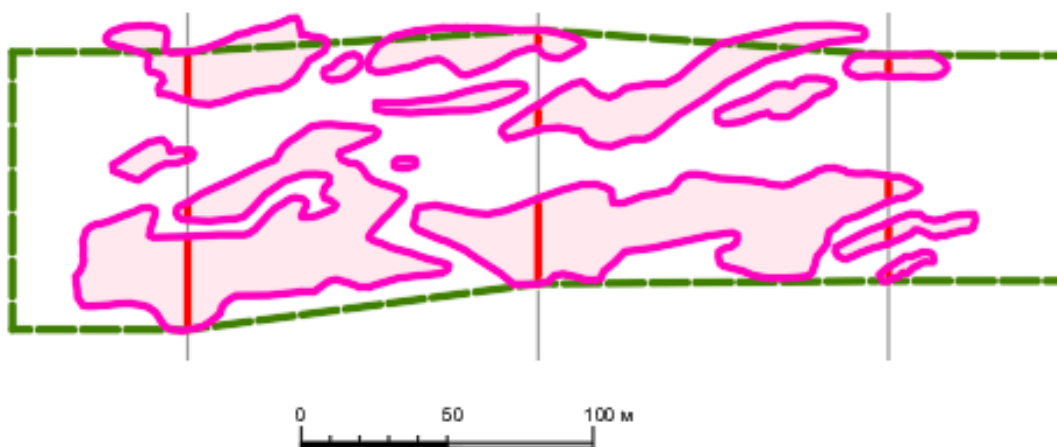
В предлагаемой системе количественных морфологических показателей отсутствуют размеры рудных объектов, хотя различие по масштабу является ведущим признаком классификации.

Группировка месторождений по сложности строения предполагает их разделение по масштабу: уникальные, крупные, средние, мелкие и весьма мелкие [37, 66]. Можно отметить, что изменение масштаба объекта необязательно сочетается с изменением предложенных показателей сложности, в том числе величины коэффициента рудоносности.

Коэффициент рудоносности характеризует долю руды в некотором выделенном объеме. Чаще всего он вычисляется как отношение суммарной мощности рудных интервалов к суммарной мощности пересечений в пределах рудоносного объема. В этом случае он описывается как «линейный коэффициент рудоносности». В других ситуациях он определяется как соотношение рудной и общей площади или как соотношение числа рудных пересечений на проекции залежи к общему числу пересечений в ее контуре.

По своей сущности коэффициент рудоносности ( $K_p$ ) является характеристикой образований низких структурных уровней - зон или залежей, которые часто не имеют объективно установленных границ. Другим недостатком этого показателя как характеристики сложности строения является его зависимость от параметров разведочной сети, на стадии отработки сеть является предельно плотной, величина  $K_p$  становится равной 1, хотя сложность строения объекта остается прежней.

Это положение можно проиллюстрировать на примере одного из золоторудных объектов, для которого форма рудных тел выявлена по данным эксплуатационной разведки. На рисунке 3.1 имитируется выделение рудоносной минерализованной зоны по относительно редкой сети пересечений (шаг – 120 м).



*Рисунок 3.1 – Выделение рудоносной зоны по редкой сети пересечений  $K_p = 0.504$  красным – «истинный» контур рудных тел; зеленым – контуры рудных залежей*

При сгущении сети пересечений до 40 м (Рисунок 3.2) возникает возможность выделения в пределах минерализованной зоны рудоносных залежей с более высокими коэффициентами рудоносности: для верхней залежи он составляет 0,701, а для нижней – 0,794.

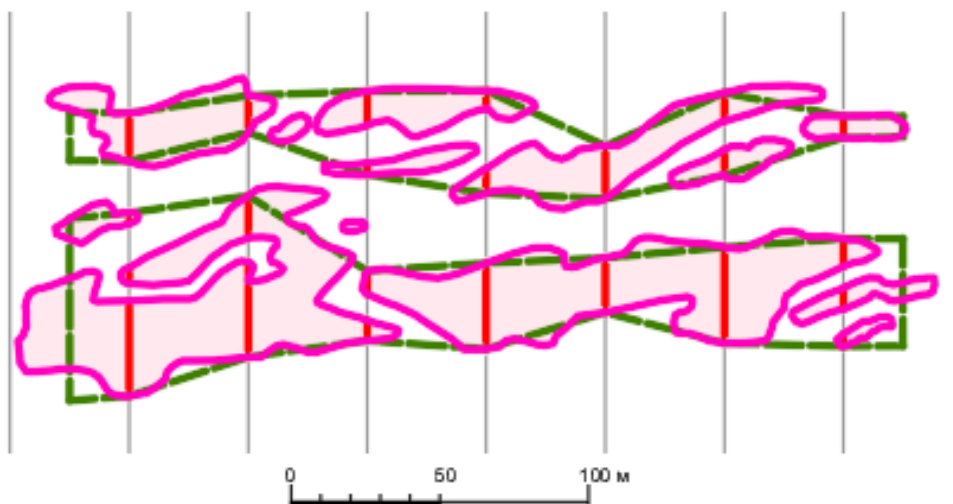


Рисунок 3.2 – Выделение рудоносных залежей в пределах зоны при сети пересечений 40 м

Дальнейшее увеличение плотности сети до 20 м между пересечениями приводит к ситуации (Рисунок 3.3), при которой можно выделять практически сплошные рудные тела, ошибки геометризации при этом имеют незначительную величину.

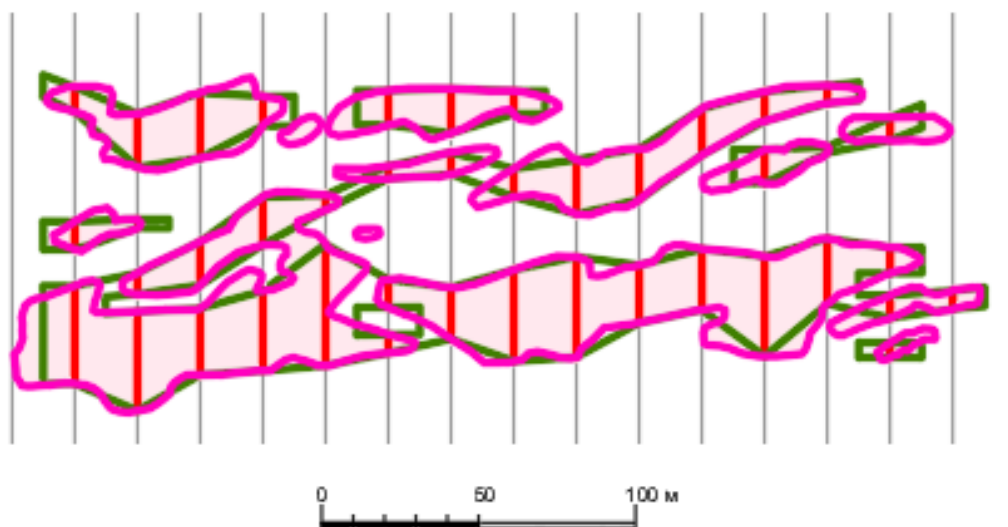


Рисунок 3.3 – Оконтуривание рудных тел без использования коэффициента рудоносности; шаг сети – 20 м

Таким образом, коэффициент рудоносности не является фиксированной величиной для рудного объекта и не может определять сложность его строения. Следует также отметить, что его величина не используется ни в одной из известных методик обоснования геометрии разведочной сети. Возможности его применения для объективного разделения объектов по сложности строения чрезвычайно ограничены.

Показатель сложности  $q$  предлагается рассматривать как количественную меру для отнесения месторождения к той или иной группе классификации ГКЗ по морфологическим

особенностям. С его помощью предполагается характеризовать прерывистость оруденения по простиранию или падению. Величина  $q$  вычисляется как отношение числа рудных пересечений к их общему числу, включая оконтуривающие выработки. Методика расчета данного показателя в разных ситуациях однозначно не определена. Он относительно просто рассчитывается для пластообразных, жилообразных тел в разрезах. Вместе с тем на простом примере (Рисунок 3.4) видно, что его величина тесно связана с шагом или размерами ячейки сети – она увеличивается при уменьшении ее параметров.

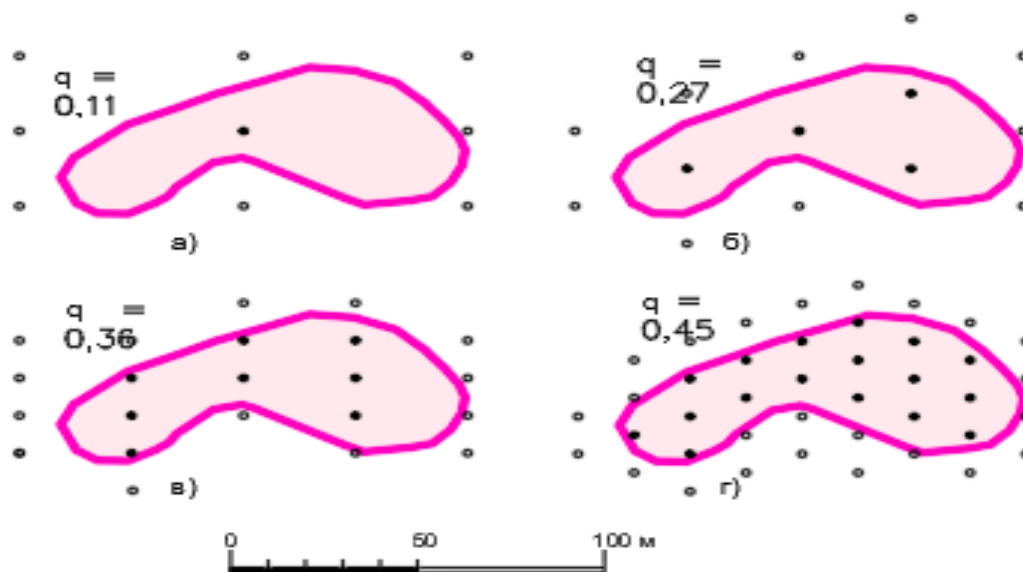


Рисунок 3.4 – Изменение величины показателя сложности в зависимости от плотности разведочной сети

Для варианта оконтуривания по относительно редкой сети (вариант а) величина показателя сложности  $q$  составляет 0.11, при сгущении сети (варианты б, в и г) значения величины  $q$  последовательно возрастают, составляя 0.27, 0.36 и 0.45, соответственно.

На штокверковых (штокверкоподобных) месторождениях применение показателя сложности весьма проблематично, общепринятая методика их оценки отсутствует. Показатель сложности фактически не участвует в обосновании геометрии разведочной сети и оценке разведанности запасов. В связи с этими обстоятельствами его использование для количественной характеристики морфологических особенностей объектов нецелесообразно.

Для количественной характеристики степени изменчивости свойств оруденения предлагается использовать коэффициенты вариации мощности и содержаний полезного компонента.

Коэффициент вариации мощности рассматривается как характеристика сложности формы рудного тела. Эффективность его применения можно рассмотреть на ряде примеров, в том числе



на модельных объектах А, Б и В, имитирующих разную форму рудных тел при сходной их мощности (Рисунок 3.5).

Представленные объекты характеризуются одинаковым коэффициентом вариации мощности (около 30 %). Вместе с тем понятно, что они имеют разную сложность, обусловленную положением контуров рудных тел.

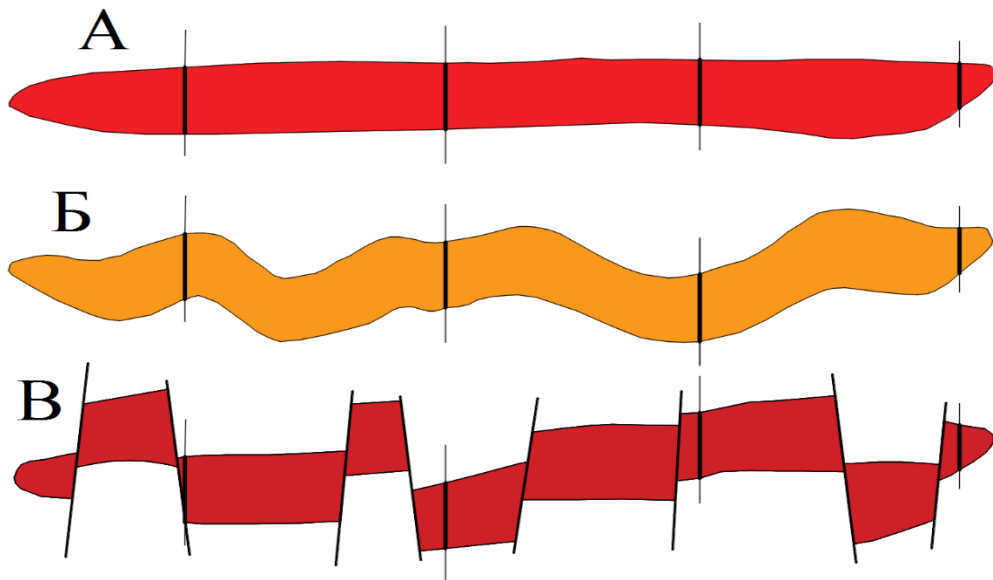


Рисунок 3.5 – Модельные объекты А, Б и В разной формы при сходстве значений мощности

Другим недостатком данного показателя является отсутствие связи его величины с масштабом оруденения (Рисунок 3.6).

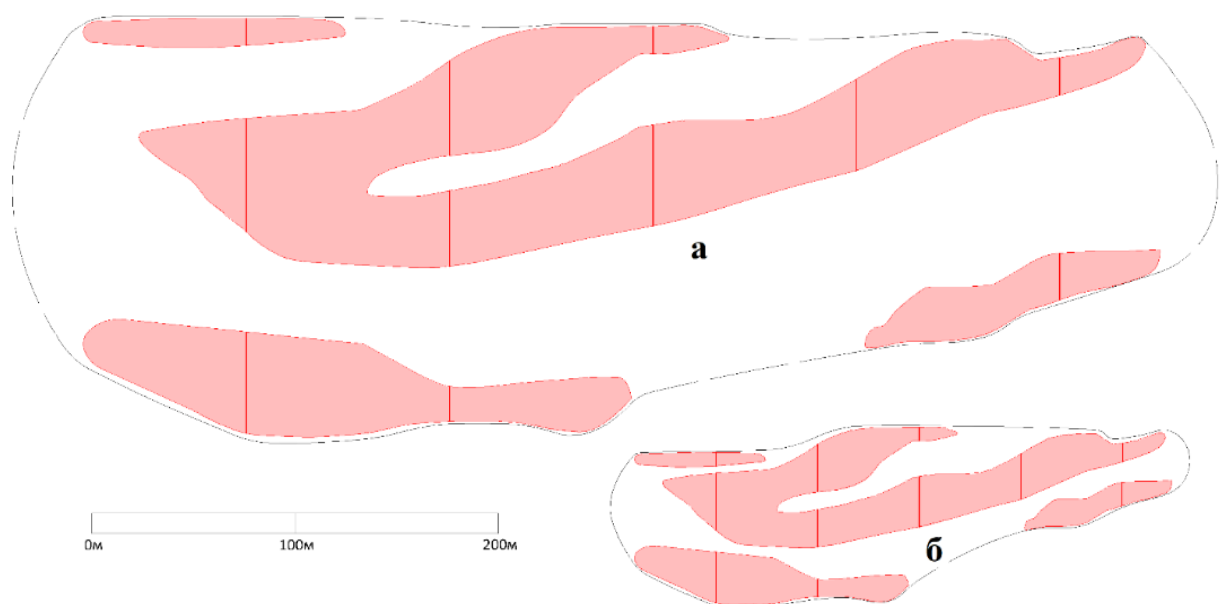


Рисунок 3.6 – Рудные образования разных размеров (а – крупные, б - мелкие) с одинаковой степенью изменчивости мощности

На представленном примере (Рисунок 3.6) видно, что объекты **а** и **б** относятся к разным группам сложности строения вследствие различия в масштабах, хотя коэффициент вариации мощности для них является одинаковым.

Такая же ситуация отмечается на других золоторудных месторождениях. В качестве примера можно привести месторождение Нежданинское, где были определены коэффициенты вариации мощности и содержаний по способам обработки и вариантам кондиционных показателей (Таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Коэффициенты вариации мощности и содержаний по вариантам кондиций

Рудное тело	V <sub>c</sub> , %								V <sub>m</sub> , %							
	ОГР				ПГР				ОГР				ПГР			
	0,6	0,9	1,2	1,5	1,5	2,0	2,5	3,0	0,6	0,9	1,2	1,5	1,5	2,0	2,5	3,0
Рудное тело 1	125	121	118	152	153	148	141	138	98	99	96	97	94	96	100	103
Рудная зона 1	196	136	133	152	151	145	136	133	110	100	101	101	103	103	108	109
Все остальные тела	219	216	225	218	217	207	209	197	131	131	130	130	130	125	129	131

Изменение кондиционных показателей всегда связано с изменением масштаба объектов (запасов руды) и размеров рудных тел, что должно отражаться на их классификации по сложности. Для данного объекта рассмотрено изменение бортового содержания золота в довольно большом диапазоне – от 0,6 до 3,0 г/т. В то же время оказалось, что этот фактор практически не влияет на величину коэффициента вариации, его значения для всех вариантов кондиций в пределах выделенных рудных тел и зон остаются исключительно стабильными.

Таким образом, коэффициент вариации мощности как классификационный признак для определения сложности морфологии объекта является малоэффективным и может иметь только вспомогательное значение.

Коэффициент вариации содержаний характеризует степень изменчивости содержаний полезного компонента, что является важным условием оценки сложности строения объекта. Кроме того, основной смысл его использования заключается в определении погрешности в оценке среднего содержания в пределах объекта или его частей. В свою очередь на его основе должны решаться задачи обоснования параметров разведочной сети и квалификации запасов.

В существующей практике описания изменчивости геологоразведочных параметров коэффициент вариации содержаний характеризуется по рудным интервалам (пересечениям). Такой подход возник на начальных этапах внедрения математических методов в геологию, когда возможности обработки больших массивов данных были весьма ограничены. Объем выборок с данными по разведочным пересечениям/интервалам был относительно небольшим, что

позволяло проводить расчеты даже в «ручном» режиме. В настоящее время такой подход представляется несостоятельным прежде всего потому, что в выборках для расчетов присутствуют значения, характеризующие интервалы разной длины; выборка является неоднородной по геометрической базе. Кроме того, возможности математической обработки данных многократно расширились, что дает возможность проводить исследования на выборках практически любого объема, имеются также условия графического отображения полученных результатов.

Особенности оценки коэффициента вариации содержаний ПК по пересечениям, в сравнении с его вычислением по исходным замерам – пробам, могут быть рассмотрены на примере золоторудного месторождения Сухой Лог. Анализ проведен для разных уровней бортовых содержаний, минимальная мощность рудного тела принята равной 15 м, максимальная мощность пустого прослоя – 15 м. Результаты расчетов представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Статистические характеристики распределений содержаний по рудным интервалам и пробам для вариантов оконтуривания

Борт. сод., г/т	Кол-во проб	Среднее сод. Au, г/т	Станд. откл.	Коэф-т вариации, %
по рудным интервалам				
0.3	1251	1.61	2.710	169.0
<b>0.5</b>	<b>1004</b>	<b>2.34</b>	<b>4.240</b>	<b>181.0</b>
0.7	854	2.94	5.430	185.0
по пробам в рудных интервалах				
0.3	25626	1.76	3.058	174.3
<b>0.5</b>	<b>19569</b>	<b>2.15</b>	<b>3.391</b>	<b>157.7</b>
0.7	15848	2.48	3.671	147.7

Можно отметить, что средние содержания золота по вариантам кондиций для рудных интервалов и проб достаточно существенно различаются, по рудным интервалам для бортовых содержаний 0,5 и 0,7 г/т они оказались выше на 9 % и 18,5 %, чем по пробам. Коэффициенты вариации содержаний по рудным интервалам и пробам для варианта бортового содержания золота 0,3 г/т являются сопоставимыми, а для вариантов 0,5 и 0,7 г/т по пробам они оказались ниже, чем по рудным интервалам.

Причиной создавшейся парадоксальной ситуации явилось наличие маломощных рудных интервалов с достаточно высокими содержаниями золота. Корреляционное поле точек содержаний и мощности для рудных интервалов при бортовом содержании 0,5 г/т показано на рисунке 3.7. Корреляционная связь между этими признаками - линейная или нелинейная – практически отсутствует.

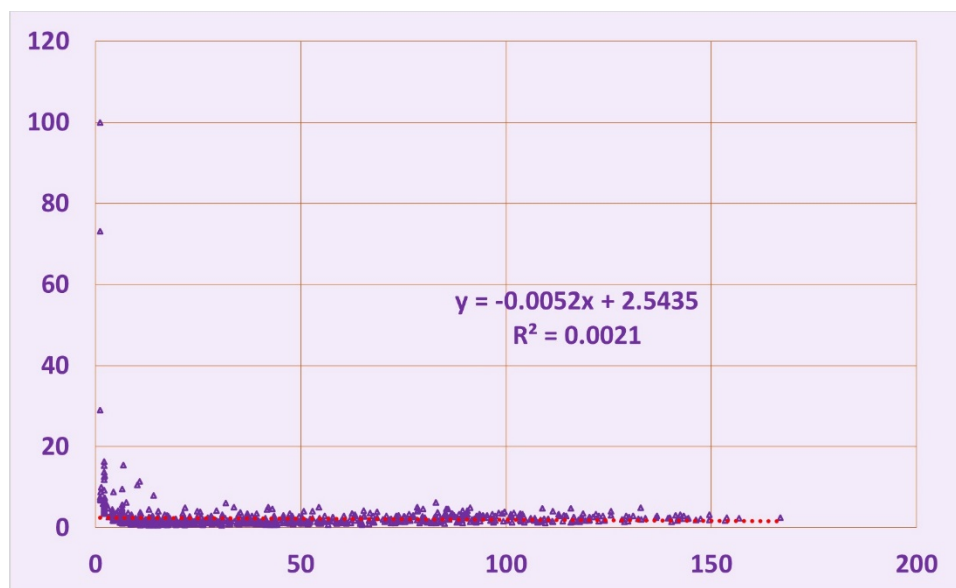


Рисунок 3.7 – Корреляционное поле точек мощности и содержаний золота в рудных интервалах при бортовом содержании 0.5 г/т

При расчетах маломощные интервалы имеют такой же статистический вес, как и интервалы с высокой мощностью, хотя доля руд с такими содержаниями исключительно низка. В итоге их влияние на результаты расчетов искусственно завышается.

Можно также отметить, что при подсчете запасов используются средние содержания по пересечениям, вычисленные с учетом взвешивания на их мощность, что эквивалентно расчету среднего содержания по всем пробам, попавшим в границы подсчета. Таким образом, оценка изменчивости, полученная по рудным интервалам без учета геометрической базы измерений (мощности), не имеет отношения к фактическим результатам подсчета запасов, она принципиально не может использоваться для расчета погрешности вывода средних содержаний.

Исходя из этого, наиболее объективной характеристикой изменчивости является величина коэффициента вариации, вычисленная по пробам равной длины, которые, как правило, представляют собой исходные замеры свойств объекта. При использовании проб разной длины требуется предварительно провести их композитирование, то есть приведение замеров к одинаковой длине.

Оценка вариабельности содержаний полезного компонента, полученная для данных условий, позволяет определять погрешность вычисления средних значений в конкретных блоках, что в дальнейшем может быть использовано для квалификации запасов по ним. Кроме того, на этой же основе может быть определено необходимое число проб или композитов и определены параметры разведочной сети.

Следует подчеркнуть, что в зарубежных отчетах [101-139] при описании свойств объектов постоянно используются статистические характеристики изменчивости содержаний ПК,

отнесенные к пробам или композитам. Эти же содержания участвуют в расчетах вариограмм и в интерполяции содержаний в ячейки блочной модели.

В целом показатели, предложенные в настоящее время для количественного определения сложности строения объектов, являются неэффективными и требуют коренного пересмотра.

### **3.3 Совершенствование группировки месторождений по сложности строения**

Целевым назначением группировки золоторудных месторождений по сложности строения является определение методики изучения объектов и выбор параметров разведочной сети на основе метода аналогии. Вместе с тем надежные количественные показатели, позволяющие относить объект к той или иной группе, в настоящее время отсутствуют. Эти обстоятельства вызывают необходимость ее совершенствования с учетом факторов, прямо определяющих разведанность запасов и плотность сети наблюдений. В рамках решения этой задачи представляется необходимым рассмотреть также вопрос об объектах оценки сложности строения.

#### **3.3.1 Рекомендуемые количественные показатели сложности строения золоторудных объектов**

На основе проведенного анализа установлено, что предлагавшиеся ранее количественные показатели сложности геологического строения месторождений являются не состоятельными или недостаточными. Их основной недостаток заключается в том, что они не связаны с разведанностью запасов и не позволяют определять параметры разведочной сети. В связи с этим, для описания сложности геологического строения золоторудных объектов предлагается использовать характеристики, поддающиеся однозначному определению и количественной оценке.

В результате выполненных исследований по изучению свойств оруденения доказано, что основными классификационными признаками группировки месторождений для целей разведки должны являться:

- масштаб объекта и ожидаемая производительность предприятия;
- морфологический тип оруденения;
- фрактальная размерность  $D$  (мера Хаусдорфа);
- изменчивость содержаний полезного компонента, характеризуемая по пробам равной длины или по композитам.

Масштаб объекта традиционно является важной характеристикой оценки месторождения. В существующих Методических рекомендациях... [66] дается только качественное деление золоторудных объектов по этому признаку. Их возможные градации по величине запасов руды

обсуждались в главе 2. Сам по себе масштаб оруденения в исключительно редких случаях может быть однозначно установлен в процессе ведения геологоразведочных работ каждой стадии. Очень часто эта характеристика меняется во времени как вследствие прироста запасов, так и в результате изменения требований промышленности к качеству минерального сырья. Примерами такого рода изменений являются месторождения Олимпиадинское, Наталкинское, Вернинское, где в процессе их изучения запасы возрастали в несколько раз. Более устойчивой и однозначно определяемой характеристикой, связанной с масштабом объекта, является годовая производительность предприятия. Она может определяться на разных стадиях работ, включая стадии поисков и оценки, и корректироваться при изменении кондиционных показателей. Кроме того, она дифференцированно устанавливается для разных способов отработки месторождений, что позволяет учитывать сложность отдельных частей объектов. Оценка масштаба объекта через проектную или фактическую производительность горнодобывающего предприятия позволяет более корректно учесть его потребности при проектировании и ведении добычных работ.

Календарный год является максимальным сроком, на котором базируется текущая отчетность предприятия, в том числе по финансово-экономическим показателям. Наиболее важным из них является безубыточность работ за данный период. Представляется, что именно это условие должно рассматриваться при оценке разведанности запасов, положенных в основу геолого-экономической оценки месторождений.

По величине годовой производительности, которую можно рассматривать как шкалу для измерения масштабов месторождения, предлагается провести разделение объектов на следующие группы: более 15 млн т, от 5 до 15 млн т, от 1.5 до 5 млн т, от 0.5 до 1.5 млн т и менее 0.5 млн т. Соотношение запасов в граничных классах составляет около 3, что обеспечивает пропорциональную их градацию и выделение классов уникальных, крупных, средних, мелких и весьма мелких месторождений. В соответствии с существующей группировкой ГКЗ для золоторудных месторождений, второй группе должны соответствовать годовая производительность более 15 млн т и от 5 до 15 млн т, третьей группе – от 1,5 до 5 млн т и от 0, до 1,5 млн т, четвертой – менее 0,5 млн т. Необходимость разделения объектов, относимых ко второй и третьей группе на подгруппы, определяется большим диапазоном различий в величине запасов.

Можно также отметить, что зарубежными исследователями [1, 40, 95, 97, 99] производительность предприятия за определенный период времени рассматривается как один из элементов оценки разведанности месторождений.

Предложенное разделение объектов по морфологическим типам является в значительной мере традиционным, этот признак достаточно просто устанавливается на ранних стадиях работ. Вместе с тем при характеристике жильных тел по величине фрактальной размерности, а также

вариабельности содержаний предлагается разделять на жилы простого и сложного строения. Эта операция требует дополнительных сведений, получаемых на участках детализации.

Фрактальная размерность объекта сопряжена с морфологическими типами оруденения, для целей классификации она может быть оценена по аналогии с уже известными объектами. Аспекты определения и практического использования этой характеристики рассмотрены более подробно в главах 2 и 4.

Изменчивость содержаний, оцененная по пробам или по композитам, достаточно просто определяется на ранних стадиях работ даже по ограниченному объему опробования, по крайней мере для основной части изучаемого объекта. Эта характеристика позволяет осуществить расчет параметров сети даже в условиях ограниченной информации. Степень изменчивости содержаний можно условно разделить на низкую, среднюю, высокую и весьма высокую. По величине коэффициента вариации это соответствует значениям: менее 150 %, от 150 % до 250 %, от 250 % до 350 % и более 350 %. Предложенные градации установлены на основе опыта изучения изменчивости ряда золоторудных месторождений разных масштабов и морфологических типов. Крупные месторождения характеризуются, как правило, низкой и средней изменчивостью содержаний, мелкие объекты имеют, в большинстве случаев, высокую и весьма высокую изменчивость.

Вариабельность содержаний всегда обнаруживает связь с параметрами опробования, особенно сильно на ней сказывается длина проб, по которым выполняется изучение изменчивости. В предложенной градации коэффициент вариации указан для проб, приведенных к длине 1 м. Этот параметр опробования наиболее часто используется при изучении золоторудных месторождений. В случае, если длина проб или композитов существенно отличается от данного значения, в величину коэффициента вариации может вноситься поправка, вычисление которой представляет собой относительно сложную, но решаемую задачу. Прежде всего следует отметить, что параметры опробования, в том числе длина проб, оказывают влияние только на величину эффекта самородков, пространственная/природная компонента изменчивости сохраняет при этом свою величину. С теоретических позиций увеличение длины пробы в  $N$  раз должно приводить к снижению дисперсии самородков также в  $N$  раз. Например, если доля эффекта самородков составляет 0.1 в общей дисперсии, то увеличение длины пробы в 2 раза должно повысить эту долю до 0.2. Суммарно общая дисперсия возрастет на 10 %.

В действительности эффект от изменения длины пробы в определенной степени блокируется наличием закономерностей в изменении содержаний по мощности рудного тела. Их «коррелируемость» в этом направлении может фиксироваться по вариограмме, которая характеризует изменение доли случайной компоненты при увеличении длины пробы. В итоге при изменении этого параметра в 2 - 3 раза величина поправки может составить 5 % - 15 %.

Аналогично не приводит к существенному изменению общей дисперсии снижение длины пробы. Вместе с тем в этом случае могут резко увеличиться затраты на отбор и обработку проб, а также на аналитические работы.

В сравнении с классификацией золоторудных месторождений по сложности строения, представленной в Методических Рекомендациях [66], в данных предложениях предусматривается более дробное деление на подгруппы в зависимости от масштаба месторождения, что соответствует практике разведки месторождений разного масштаба. Кроме того, предусмотрено также дробное деление объектов по степени изменчивости, что также дает возможность более корректно проводить выбор параметров разведочной сети (см. главу 5).

При разработке классификации для других видов минерального сырья требуется корректировка морфологических типов и их фрактальной размерности, граничных значений для оценки масштабов объектов, а также градаций по изменчивости содержаний компонентов.

### **3.3.2 Объекты оценки сложности геологического строения**

Подходы к оценке сложности геологического строения определились во времена плановой экономики, когда этот фактор определял необходимость получения определенного соотношения запасов разных категорий по результатам разведочных работ, что в свою очередь было связано с объемами их финансирования. В настоящее время такое соотношение нормативно-методическими документами не регламентируется. Вместе с тем для месторождений 4-ой группы сложности определена возможность совмещения разведочных и эксплуатационных работ.

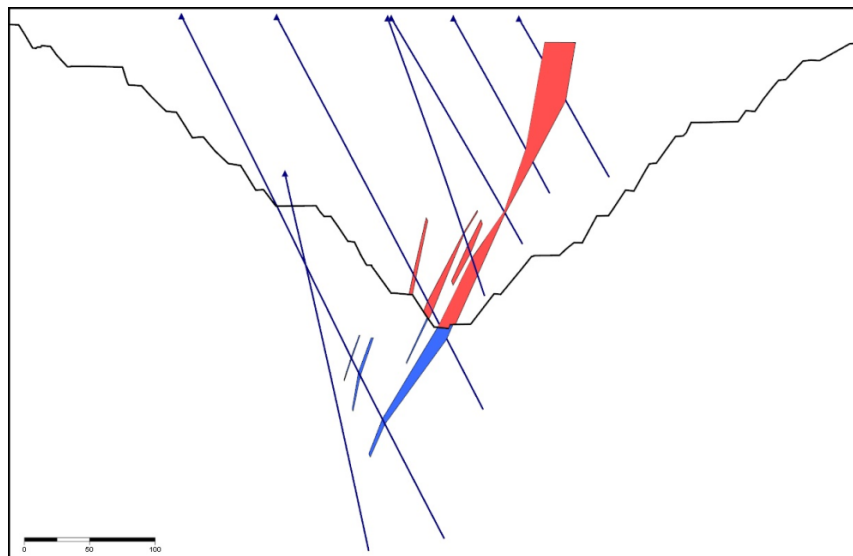
Условием отнесения месторождения к определенной группе сложности являлось соответствие требованиям к морфологии и изменчивости параметров более 70 % его балансовых запасов. Таким образом, объектом оценки сложности строения является все месторождение в целом без деления его на какие-либо части.

В настоящее время необходимость такого «упрощенного» подхода вызывает сомнение, поскольку он не ориентирован на решение задач оценки конкретных частей геологического объекта.

Основные свойства рудных месторождений зависят не только от их геологической природы, но и от требований промышленности к качеству и количеству минерального сырья, которые реализуются в кондициях. Оконтуривание значительной части рудных месторождений производится на основе кондиционных показателей, в число которых входят: бортовое содержание, минимальная мощность рудного тела и максимальная мощность прослоев пустых пород и некондиционных руд.



Параметры кондиций определяют изменчивость и морфологические особенности рудных тел, включая их размеры по разным направлениям. В максимальной степени различия этих свойств проявляются для частей месторождения, обрабатываемых открытым (ОГР) и подземным способами (ПГР). При переходе на подземный способ обработки и «ужесточении» кондиций существенно уменьшаются размеры рудных тел, повышается неопределенность их оконтуривания, что само по себе позволяет говорить об изменении сложности строения объекта. Понятно, что для разведки запасов таких тел по определенной категории требуется относительно более плотная сеть, чем для рудных тел, выделяемых по кондициям для условий ОГР. Уменьшение размеров рудных тел при переходе от открытой обработки к подземной можно проиллюстрировать рисунком 3.8, на котором приведен разрез по месторождению Бахмут 3.



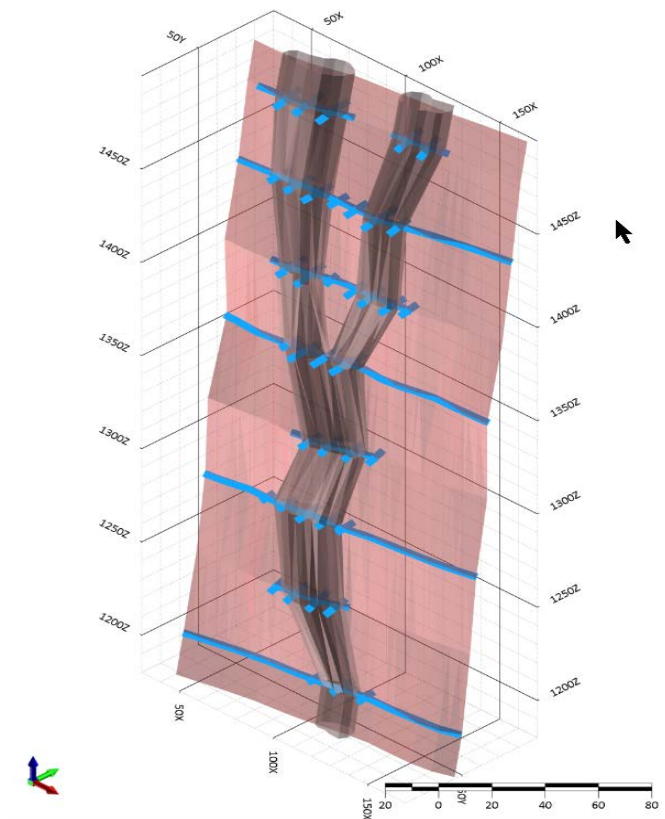
*Рисунок 3.8 – Рудные тела, выделенные по кондициям для открытой (красное) и подземной (синее) обработки в разрезе по месторождению Бахмут 3.*

Следует также отметить, что для ряда объектов, например, для золоторудных месторождений Бамское и Кючус, соотношение балансовых запасов открытой и подземной обработки составляет примерно 50:50, что существенно затрудняет определение сложности геологического строения объекта по установленным правилам.

Задачу оценки сложности строения месторождения можно рассматривать не только с позиций изменения параметров оруденения при использовании разных кондиционных показателей. В действительности, в его пределах могут существовать участки, отличающиеся от основной части объекта своими размерами и морфологическими особенностями. Очевидно, что для их разведки по выбранной категории требуется использование сети, соответствующей по параметрам этим свойствам, то есть необходимо отнесение этих частей к другой группе сложности даже при относительно небольшом количестве в них запасов. Во всяком случае, такие участки требуют корректировки параметров сети в сравнении с выбранной для месторождения в целом.

Данная ситуация достаточно часто отмечается при рассмотрении отчетов с подсчетом запасов в ГКЗ РФ, когда авторы относят части объекта к разным группам сложности. Особого упоминания заслуживают случаи, когда при завершении отработки месторождений изначально относительно простого строения остаточные запасы в рудных телах и залежах на флангах и глубоких горизонтах авторы относят к 4-ой группе сложности. С формальных позиций такую «переквалификацию» можно рассматривать как неправомерную, хотя с практической точки зрения для обоснования разведочной сети и квалификации запасов она вполне оправдана.

Возможность дифференцированной оценки сложности геологического строения частей единого объекта фактически определена в Методических рекомендациях... Золото рудное [66], где отдельно приводится характеристика кор выветривания золоторудных месторождений и даются рекомендации по выбору для них параметров разведочной сети независимо от основной их части. Подобные случаи отмечаются на других золоторудных объектах. Например, на ряде золоторудных объектов (Албын, Маломыр, Кочбулак), представленных телами относительно простого геологического строения, выявляются также трубообразные тела, имеющие небольшие размеры, но характеризующиеся исключительно высокими содержаниями золота (Рисунок 3.9).



*Рисунок 3.9 – Богатое трубообразное рудное тело в плоскости золотоносной жилы*

На золоторудном месторождении Нежданинское, кроме рудной зоны 1, имеющей большие размеры по падению и простираению и относительно низкую изменчивость содержаний, имеются также опережающие структуры, характеризующиеся относительно небольшими размерами по падению и простираению, малой мощностью рудных тел в сочетании с

повышенным качеством руд и значительной изменчивостью содержаний (Рисунок 3.10). Сложность строения этих тел, а также параметры разведочной сети, необходимые для получения запасов определенной категории, должны отличаться от таковых, рекомендованных для основной части объекта.

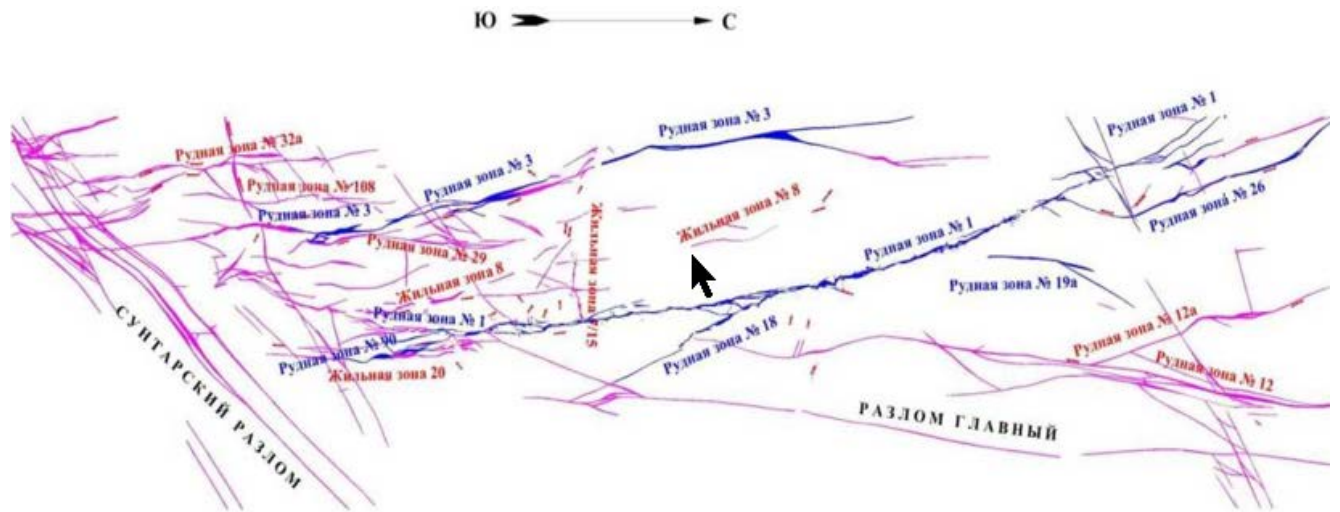


Рисунок 3.10 – Схема расположения основных рудных тел Нежданнинского месторождения (по Слезко В.А., Дарьиной Ю.И., 2009)

Особая ситуация возникает в случаях, когда в непосредственной близости от разрабатываемых месторождений выявляются новые участки, учет запасов которых можно рассматривать как их оперативное изменение. Проведение разведочных работ здесь требует корректировки сети в сравнении с основным объектом.

Таким образом, объектом оценки сложности строения могут быть части месторождения, различающиеся условиями отработки, особенностями морфологии и характеристик изменчивости оруденения. В этом случае будет обеспечиваться достаточно гибкое изменение параметров разведочной сети применительно к заданной категории запасов и их корректная квалификация.

*На основании выполненных исследований к защите предлагается первое тезисное положение:*

***При количественной оценке сложности геологического строения золоторудных месторождений необходимо и достаточно рассматривать в качестве классификационных признаков: масштаб изучаемых объектов, морфологию рудных скоплений, включая определение типа и фрактальной размерности, и изменчивость содержаний в пробах равной длины или в композитах.***

***Оценка сложности строения может проводиться для месторождения в целом или для его частей, различающихся условиями отработки, особенностями морфологии и характеристиками изменчивости оруденения.***

## 4 МЕТОДЫ ОБОСНОВАНИЯ РАЗВЕДОЧНОЙ СЕТИ

### 4.1 Основные понятия

*Разведочная сеть* представляет собой систему размещения разведочных пересечений в пространстве изучаемого объекта. Для месторождений уплощенной формы (пласты, жилы и минерализованные зоны) она рассматривается относительно плоскости рудных тел и залежей. Для месторождений изотропной (штокверки) или удлиненной (трубки) формы параметры сети, как правило, анализируются применительно к их сечениям.

Пересечения располагаются по продольным и поперечным линиям. Они ориентируются, как правило, под прямым углом друг к другу и формируют прямоугольную или квадратную сеть. В редких случаях линии ориентируются под углом  $45^\circ - 60^\circ$  и образуют ромбическую сеть (Рисунок 4.1). Часть площади/сечения рудного тела, ограниченная парами смежных продольных и поперечных линий, называется *разведочной ячейкой*. При равномерном расположении линий различной ориентировки площадь ячейки соответствует площади рудного тела, приходящейся на одно разведочное пересечение, она характеризуется также термином *плотность* сети.

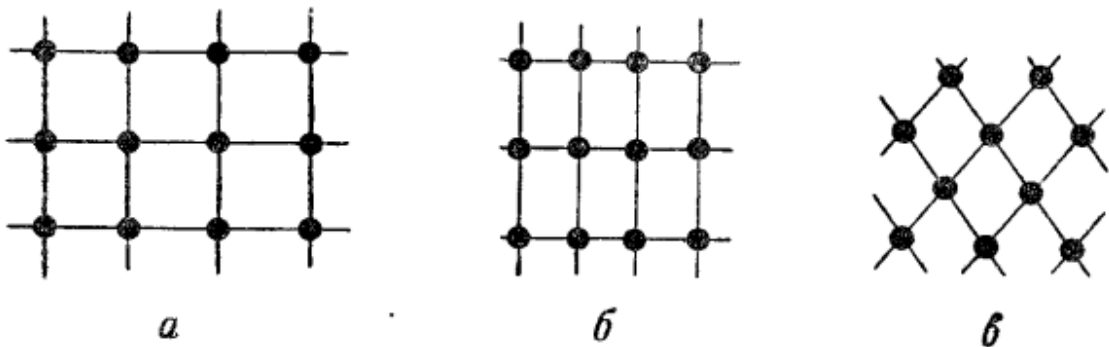


Рисунок 4.1 – Правильные (равномерные) разведочные сети (по В.М.Крейтеру)  
а – квадратная, б – прямоугольная, в – ромбическая

Под *густотой* разведочной сети понимается количество разведочных пересечений, отнесенных к единице площади рудного тела.

Размеры разведочной ячейки по разным направлениям и их пространственная ориентировка определяют *геометрию разведочной сети*. Отношение длинной стороны ячейки к короткой называется *удлинением*. Качество геологоразведочных работ по созданию сети для получения запасов заданной категории определяется ее равномерностью и отклонениями пересечений от проектного положения.

Геометрия разведочной сети выбирается с учетом свойств полезного ископаемого и необходимой детальности изучения оруденения. Детальность изучения рудных тел и залежей (разведанность) отражается в категориях запасов. К основным свойствам полезного ископаемого,

определяющим выбор параметров сети, относятся морфологические характеристики рудных тел: длина, ширина, мощность, их выдержанность или прерывистость, нарушенность разрывными и пликативными структурами. Кроме того, в число этих свойств входят также показатели, определяющие качество полезного ископаемого, в том числе содержания компонентов, гранулометрические характеристики сырья, прочностные, декоративные и другие свойства. При выборе параметров сети учитывается характер и интенсивность изменения данных показателей, наличие разнородных по свойствам участков и их размеры.

Рациональной относительно изучаемых параметров является сеть, удлинение которой соответствует *анизотропии* свойств объекта. Длинная сторона ячейки ориентируется по направлению минимальной изменчивости, которой обычно соответствует простирание рудного тела. Короткая сторона ячейки ориентируется по направлению максимальной изменчивости, совпадающему в целом с шириной (падением) залежи.

*Основными факторами*, определяющими изученность запасов, как отмечалось в главе 2, являются *свойства объекта*: изменчивость параметров, морфология рудных образований, а также *плотность разведочной сети*, с которой связана детальность характеристики этих свойств. Совокупное влияние каждого из факторов может быть выражено в виде числовых показателей, которые получили название «*критерии*» разведанности [13, 30-32, 36, 40, 44, 85, 86, 94]. Критерии рассматриваются отдельно для изменчивости признаков и для характеристик формы рудных тел. В первом случае значение критерия выражается в виде *точности оценки* параметра или его доверительного интервала. Альтернативным для понятия *точность* является определение «*погрешность*» оценки параметра.

Во втором случае значение критерия выражается в виде величины *ошибки геометризации*, то есть ошибки в определении пространственного положения рудного тела.

Величина этих критериев, установленных в каждой конкретной ситуации, характеризует возможность отнесения запасов к той или иной категории, руководствуясь предельными значениями критериев для каждой из них.

#### **4.2 Подходы к обоснованию плотности разведочной сети в отечественной практике недропользования**

Оптимизация разведочной сети заключается в обосновании ее параметров при условии получения запасов заданной категории и минимизации затрат, связанных с созданием разведочных пересечений. Вопросы выбора геометрии разведочной сети на основе различных показателей и характеристик свойств оруденения рассматривались в работах А.Б. Каждана, В.М. Крейтера, М.Н. Денисова, В.А. Викентьева, В.А. Петрова, И.П. Шарапова, П.П. Ясковского и других авторов [2, 3, 5, 12, 14, 22, 28, 30-34, 36, 42, 43-45, 51, 53, 71, 81, 85, 94]. Среди них следует

особо отметить И.С. Васильева (1888-1929), в классификации [93] которого было предложено установить ошибку оценки «вскрытых» запасов  $\pm 5\%$ , а «детально-разведанных»  $\pm 10\%$ .

Для решения данной задачи использовались качественные и количественные подходы.

Качественный подход базируется на методе аналогии, при котором обобщается опыт разведки и отработки большого числа месторождений различных видов полезных ископаемых, характеризующихся также разной морфологией рудных залежей и показателями изменчивости свойств оруденения. Результатом такого обобщения является группировка месторождений по сложности строения, описанная в инструкциях и методических рекомендациях ГКЗ. В них для месторождений каждой из групп приведены параметры разведочных сетей, применявшихся для оценки запасов разных категорий, что может служить примером для объекта-аналога. В целом, основным недостатком качественных методов обоснования параметров разведочной сети является их неоднозначность и субъективность.

Количественный подход использует предельные значения показателей (критериев разведанности), позволяющих осуществлять выбор параметров разведочной сети для каждой из категорий.

Методы, базирующиеся на разных подходах к оценке разведанности, можно разделить по способам определения зависимости между характеристиками сети и величиной показателя на:

- а) аналитические;
- б) эмпирические.

*Аналитические методы* предполагают использование определенного математического аппарата и соответствующих теоретических представлениях о свойствах объектов (морфологических, статистических и геостатистических моделей). Их преимуществом является возможность применения прямого расчета показателей разведанности и получения решений для любых объектов, свойства которых заранее известны или предполагаются по аналогии. Недостатком этих методов является то, что ошибки в выборе моделей приводят к неверным выводам.

*Эмпирические методы*, как правило, свободны от ошибок, связанных с выбором моделей. Вместе с тем они обычно не предполагают количественного определения свойств объекта, связь показателя разведанности с ними остается невыясненной. Это резко сужает возможности применения метода аналогии и требует проведения экспериментов по обоснованию сети на каждом конкретном объекте. В свою очередь, для проведения таких экспериментов необходимо иметь достаточный объем исходных данных, в том числе по участкам детализации.

В качестве критерия разведанности в теории и практике методики разведки традиционно предлагается *погрешность или точность оценки* запасов и средних значений подсчетных геологоразведочных параметров. Обоснованию сети с использованием этого критерия

посвящена основная часть публикаций по данному вопросу [2, 3, 6, 14, 22, 30-34, 40, 43, 46, 71, 81, 85, 88]. В работах предполагается, что запасы различных категорий должны характеризоваться разной величиной погрешности оценки параметров.

Другим показателем, характеризующим изученность формы рудных тел, является *ошибка геометризации*, или ошибка в определении пространственного положения рудного тела.

Характеристика всех современных разновидностей методов анализа разведанности и обоснования оптимальной плотности разведочной сети на основе рассмотренных критериев была дана в работе группы сотрудников ГКЗ [40]. В сводном виде она представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Методы анализа разведанности и обоснования плотности разведочной сети

Метод	Критерий	Способ определения	Количественная оценка
Сопоставления	точность оценки ошибки геометризации	эмпирический эмпирический	не определяется не определяется
Разрежения и сгущения сети	точность оценки ошибки геометризации	эмпирический эмпирический	не определяется не определяется
Огибающей поверхности	ошибки геометризации	эмпирический	не определяется
Конечных разностей	точность оценки	аналитический	дисперсия, коэффициент вариации
Приконтурных искажений	ошибки геометризации	эмпирический аналитический	размеры рудных тел, контурные модули
Геостатистический	точность оценки	аналитический	дисперсия, коэффициент вариации
Метод Шаклеина С.В.	ошибки геометризации	эмпирический	не определяется
Математической статистики	точность оценки	аналитический	дисперсия, коэффициент вариации

Ряд предлагаемых ранее методов обоснования сети, например, метод приращений, метод вторых разностей Казаковского [31] и другие, в настоящее время не рассматриваются, так как их основные положения полностью реализуются в рамках геостатистических исследований.

Несмотря на большое количество предлагаемых методов и проведенных исследований, общепринятые принципы количественного обоснования разведочной сети в настоящее время не разработаны. Следует также отметить, что И.Д. Коган [38] вообще высказывал сомнение в возможности решения данной задачи вследствие влияния на результаты большого количества факторов.

#### 4.2.1 Точность оценки подсчетных параметров

*Точность или погрешность определения* могут анализироваться для разных подсчетных параметров: мощности, содержаний, продуктивности, запасов руды и запасов самого полезного ископаемого. Величина ошибки может быть оценена как эмпирическими методами, так и аналитическим способом по формулам математической статистики.

Погрешность оценки, как критерий разведанности, обладает следующими достоинствами для его использования:

- позволяет проводить квалификацию запасов по геологической изученности;
- дает возможность определять параметры разведочной сети расчетным путем;
- может использоваться для оценки надежности определения технико-экономических показателей;
- определяет возможный уровень колебаний качества добываемых руд при планировании добычных работ и изучении эффективности управления рудопотоками в процессе эксплуатации.

Проблемы использования данного показателя заключаются в следующем:

- сложности расчета критерия на ранних стадиях работ, когда информация о свойствах (изменчивости) оруденения недостаточна или отсутствует;
- отсутствие надежного математического аппарата для оценки показателя в условиях логнормального или другого асимметричного распределения, сложности учета наличия закономерных изменений признаков.

Для изучения погрешности оценок могут быть использованы различные свойства оруденения, что создает некоторую неопределенность в их выборе для обоснования сети и квалификации запасов. По мнению В.М. Крейтера [42, 43], наиболее важным признаком оруденения является содержание полезного компонента. Это мнение поддерживается в «Рекомендациях...» [75], где указано: «Последствия неверных оценок среднеблочных содержаний проявляются на экономических показателях горного предприятия с первых же дней его работы, поэтому при прочих равных условиях предпочтение при выборе признака должно отдаваться содержанию полезного компонента». В дальнейшем, при характеристике изменчивости свойств оруденения, если это особо не оговорено, предполагается оценка изменчивости содержаний полезного компонента.

Количественная оценка разведанности запасов, основанная на определении точности (погрешности) определения подсчетных параметров, обсуждается в разведочной литературе достаточно давно. Авторами публикаций на эту тему предлагались предельные значения погрешности для оценки запасов разных категорий. В сводном виде [40] эти предложения приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Значения погрешности оценки запасов, предлагаемые различными авторами

Автор	Категория А	Категория В	Категория С <sub>1</sub>
Барышев Н.В.	20	30-60	-
Каллистов П.Л.	15-20	25-30	40-45
Вилесов Г.И.	10-15	-	-



Продолжение таблицы 4.2

Автор	Категория А	Категория В	Категория С <sub>1</sub>
Крейтер В.М.	15-20	20-30	30-60
Джездалов А.Т.	20	30	40
Сергеев С.П.	10-12	30-40	50-60
Козак А.М.	15-20	25-30	35-40
Богацкий В.В.	15	30	45
Краевский (Польша)	12,5	15	25
Феттвайс (Германия)	20	20-40	40-60
Венгерская геол. служба	10	20	30
Югославская геол. служба	15	30	50
Болгарская геол. служба	10-20	30	50
Кубинская геол. служба	10	20	30

Погрешность оценки признаков, в том числе содержаний, обычно характеризуется в относительном виде. Она может быть представлена как: среднеарифметическая ошибка, стандартное отклонение ( $S_{отн}$ ) и величина доверительного интервала при заданной вероятности.

Основным приемом оценки погрешности (ошибки) определения геологоразведочных параметров экспериментальным путем является метод разрежения. Для применения этого приема необходимо наличие участков детализации, в пределах которых создана сеть с высокой плотностью наблюдений; значения геологоразведочных параметров, определенных по такой сети, условно принимаются за эталон. В этом случае результаты расчетов не зависят от принятой математической модели, хотя требуют учета ошибки эталона и оценки представительности участка детализации [2, 51]. Этот метод имеет ряд недостатков, осложняющих его практическое применение. В их числе разнообразие исходных данных, в том числе размеров участков детализации и плотности сети в их пределах, отсутствие единых подходов к интерпретации полученных результатов.

Для эмпирической оценки погрешности определения средних значений признака предлагается также использовать результаты сопоставления данных разведки и эксплуатации. Следует отметить, что на сходимость цифр запасов в этом случае оказывают влияние не только изменчивость анализируемого признака, но и субъективные факторы: условия применения кондиций, технология ведения добычных работ, корректность оценки потерь и разубоживания и др. В связи с этим данный подход дает, скорее всего, косвенную оценку погрешности определения значений параметров.

Наиболее удобной для практического использования является оценка точности признака, установленная с использованием аналитического метода, основанного на изучении изменчивости свойств полезного ископаемого. Применение этого подхода возможно в различных ситуациях, включающих результаты поисковых и оценочных работ, а также данные разведки и эксплуатации.

В качестве основной характеристики изменчивости традиционно рассматривается коэффициент вариации (V). Для корректировки значений показателей изменчивости используются данные геостатистического анализа (вариограммы), с помощью которых учитывается наличие пространственных закономерностей в размещении признака.

Погрешность оценки параметров/содержаний в виде величины доверительного интервала ( $\lambda$ ) при заданной вероятности оценивается по формулам математической статистики:

$$\lambda = t_a * V / \sqrt{N} \quad (4.1)$$

где  $t_a$  – значение критерия Стьюдента для заданной доверительной вероятности  $a$ ,

$V$  – коэффициент вариации геологоразведочного параметра, %,

$N$  – объем выборки.

Приведенное выражение является в определенной мере упрощенным, поскольку в нем не учтено влияние на характеристики вариабельности закономерных изменений признака. Кроме того, не детализируется процедура расчета коэффициента вариации в условиях асимметричных распределений. Некоторую неопределенность вызывает выбор значения критерия Стьюдента, в настоящее время нормативными документами он не лимитирован. В случае, если значение коэффициента Стьюдента принимается равным 1, то погрешность оценки представляет собой относительное стандартное отклонение выборочного среднего от неизвестного истинного значения.

Для обоснования геометрии сети на основе данного подхода требуется определить необходимое число наблюдений, исходя из требуемой точности оценки параметра, и затем отнести эти наблюдения к определенному объему недр – объекту изучения.

Выбор объекта изучения в работах предшественников оставался наиболее неопределенным и неоднозначным. Такое положение обусловлено тем, что на разных стадиях геологоразведочных работ изменяются условия изучения запасов определенной категории. Например, на стадии оценочных работ по категории  $C_1$  разведываются запасы только части месторождения, причем размеры этой части четко не определены. На стадии разведки количество запасов этой категории существенно возрастает, однако и в этом случае их соотношение с запасами других категорий остается неопределенным. Для месторождений первой и второй группы сложности оцениваются запасы категорий А и В, однако их количество несопоставимо меньше, чем запасов категории  $C_1$  и  $C_2$ . Соотношение различных категорий запасов на месторождении по стадиям работ в настоящее время не лимитируется.

В связи с отмеченной неопределенностью, а также с отсутствием установленных требований к точности оценки геологоразведочных параметров процедура обоснования геометрии сети на основе данного критерия для практического использования до сих пор не была представлена.

Для решения этого вопроса требуются новые подходы и проведение на их основе специализированных научных исследований.

#### 4.2.2 Использование ошибок геометризации при обосновании разведочной сети

Достаточность разведочной сети для изучения условий залегания рудных тел и правильности их оконтуривания оценивается с помощью *ошибки геометризации (ОГ)*, то есть ошибки в определении пространственного положения оруденения по разведочным данным. Изменение представлений о форме объекта и о его пространственном положении иллюстрируется рисунком 4.2.

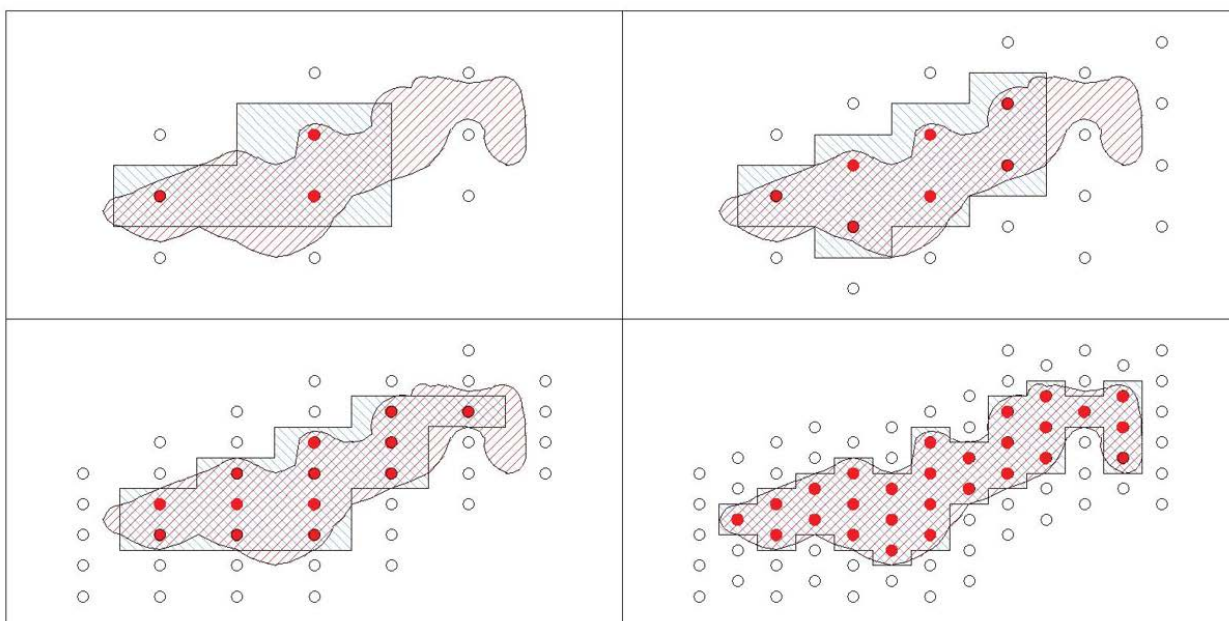


Рисунок 4.2 – Геометризация залежи при разной плотности разведочной сети

Количественное описание связи параметров сети и корректности определения пространственного положения контуров рудного тела как ошибок геометризации ( $\delta$ ) было впервые предложено Д.А. Зенковым в 1955 г. [26] В начальном предложении ее формула имела вид:

$$\delta = \sum S^I / S_{\text{ист}} * 100 \% \quad (4.2)$$

где  $\sum S^I$  – сумма площадок «искажающих» форму рудного тела;

$S_{\text{ист}}$  – истинная площадь рудного тела.

Далее это направление исследований развивалось в работах В.А. Викентьева, П.П. Яковского, В.А. Воронцова, В.Г. Будрика и других авторов [7-13, 86, 87, 91, 94].

Формула, предложенная В.А. Викентьевым для оценки этого показателя в условиях определения по эмпирическим данным, имеет следующий вид:

$$\delta(A) = 100 * (\sum S_{\text{рз}} + \sum S_{\text{пв}}) / 2 * S_{\text{ист}} \quad (4.3)$$

где  $\sum S_{\text{рз}}$  – сумма площадей рудного тела за пределами разведочного контура;

$\sum S_{\text{пв}}$  – сумма площадей безрудных участков в пределах разведочного контура;

$S_{\text{ист}}$  – истинная площадь рудного тела;

$A$  – шаг сети по разрезу или сечению.

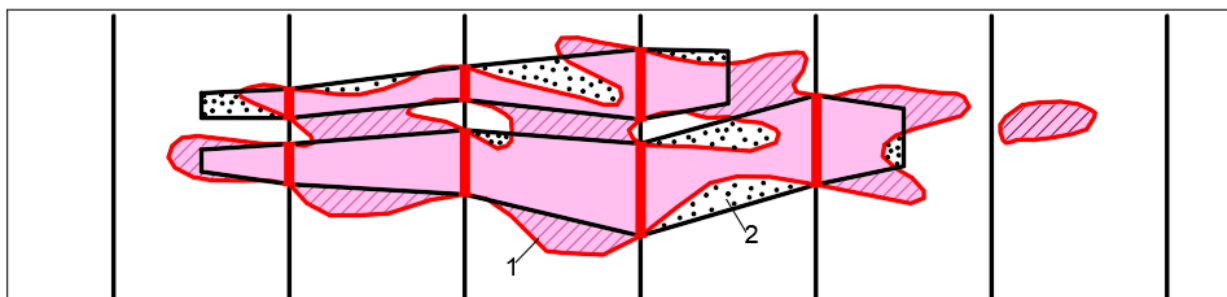
Формула может быть трансформирована в вид:

$$\delta(A) = (1 - S_{\text{совп}}/S_{\text{ист}}) * 100\% \quad (4.4)$$

где  $S_{\text{совп}}$  – площадь совпадения границ рудного тела и разведочного контура.

Использование данных формул предполагает, что «истинная» форма рудного тела определена достаточно детально на основе данных эксплуатационного опробования или на участках детализации.

Схема определения ошибки геометризации при фиксированном шаге сети представлена на рисунке 4.3.



*Рисунок 4.3 – Определение ошибок геометризации методом разрежения*

*1 – площади руды за пределами разведочного контура;*

*2 – участки/площади пустых пород внутри разведочного контура.*

Величина искажающих площадок зависит не только от морфологических особенностей объекта, но и от детальности их выявления, определяемой параметрами разведочной сети, в том числе шагом сети по заданному направлению.

Экспериментальные исследования по определению величины данного критерия при разной геометрии разведочной сети требуют наличия участков детализации, применительно к которым установленная форма рудных тел условно принимается за истинную.

Исследования, как правило, проводятся методом разрежения сети. Сущность метода состоит в наложении на исследуемый детально изученный участок более редкой сети пересечений. По рудным интервалам, выделенным в пределах пересечений, выполняется построение разведочных контуров рудного тела (Рисунок 4.3). При их построении следует учитывать все геологические особенности размещения оруденения и рудоконтролирующие факторы, установленные в процессе проведения геологоразведочных работ. Ошибки в представлениях о геологическом строении месторождения (геологической модели) влияют на результаты оценки ошибок геометризации в сторону их увеличения.

На основе сопоставления истинной формы рудного тела с результатами построения разведочных контуров устанавливаются площади на участках искажения формы. Далее ошибка геометризации для данного варианта наложения и шага сети вычисляется исходя из формул (4.3) и (4.4).

Обязательным условием применения этого подхода является использование всех возможных вариантов наложения редкой сети и вычисление по ним средних величин отклонений контуров.

Результаты исследований представляются в виде таблиц или графиков (Рисунок 4.4), выражающих изменение величины критерия в зависимости от геометрии или шага разведочной сети.

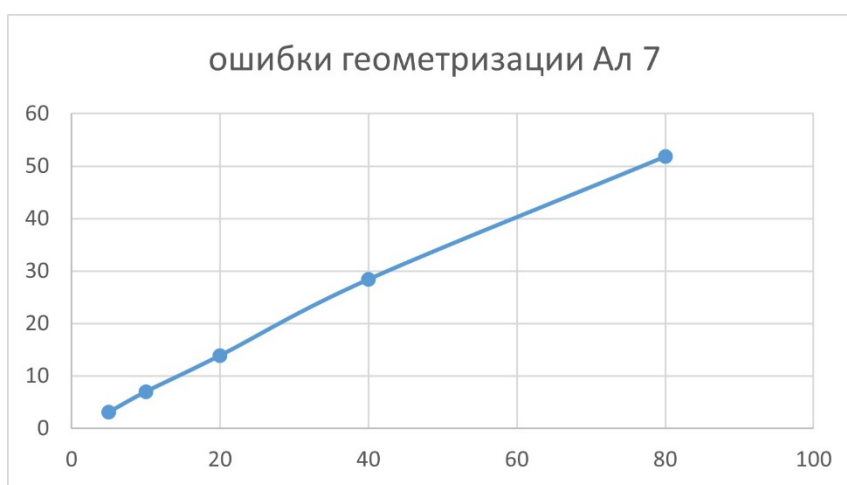


Рисунок 4.4 – График зависимости ошибок геометризации (ось Y) от шага сети (ось X)

В соответствии с выражениями 4.3 и 4.4 ошибка геометризации может меняться в диапазоне от 0 % до 100 %, хотя область ее колебаний в практике исследований редко превышает 50 %.

Ошибки геометризации могут определяться также и для проекций рудных тел. В этом случае ее величина на графике выражается как функция площади разведочной ячейки.

Современные программные средства позволяют отобразить положение разведочного и истинного контуров в 3D виде. Это дает возможность оценивать ошибки геометризации (ОГ) в объеме на основе выражения (4.4).

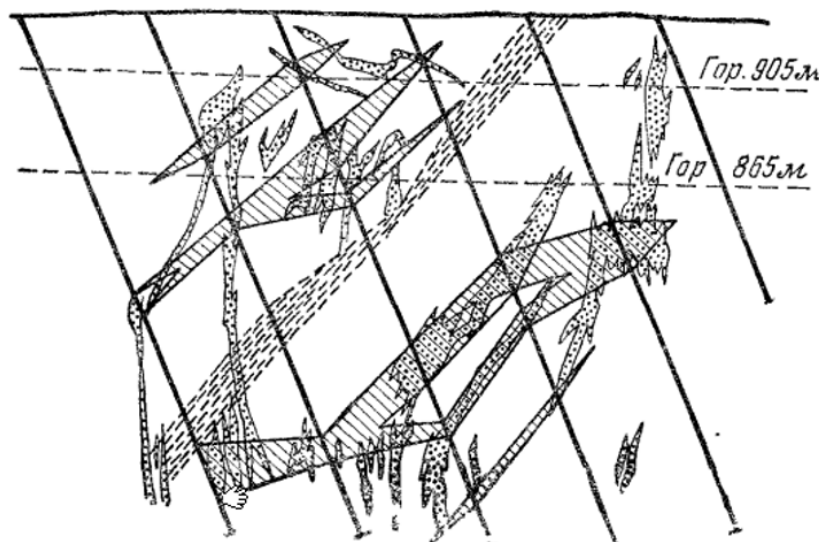
Теоретические и экспериментальные исследования ошибок геометризации, проведенные на месторождениях различных морфологических типов, позволили установить, что значения этого показателя при одной и той же геометрии (шаге) сети разведочных пересечений зависят от сложности геологического строения объектов.

В целом, преимущества использования ошибок геометризации как критерия разведанности заключаются в том, что они:

- связаны с группировкой месторождений по сложности геологического строения;

- непосредственно зависят от геометрии (плотности) разведочной сети;
- позволяют напрямую определять квалификацию запасов;
- характеризуют изученность геологического строения объекта;
- влияют на результаты геолого-экономической оценки объекта, в том числе на выбор систем отработки, особенно на ранних стадиях работ.

Последние выводы иллюстрируется рисунком 4.5, где представлено «авторское» понимание условий залегания рудных тел и их истинное положение [26].



*Рисунок 4.5 – Истинное положение рудных тел и их оконтуривание по разведочным данным при ошибочном понимании строения месторождения (по Д.А. Зенкову)*

В предложенном (разведочном) варианте оконтуривания рудные тела имеют простое строение. Представления об относительно пологом залегании при большой мощности позволяет проектировать производительные системы отработки, например, с подэтажным обрушением. Из-за неверной оценки мощности рудного тела проектные величины потерь и разубоживания окажутся заниженными. В действительности в дальнейшем потребуется пересмотреть систему отработки, при которой технико-экономические показатели отработки окажутся существенно хуже ожидаемых на начальном этапе оценки.

Эмпирическое определение ошибок геометризации по выражениям (4.3) и (4.4) является простым и достаточно наглядным. Вместе с тем при таком подходе возникают сложности в их определении и использовании, которые могут заключаться в следующем:

- затруднена их оценка на ранних стадиях работ, когда информация о строении объекта ограничена;
- требуется создание участков детализации для изучения морфологических характеристик оруденения и проведения экспериментальных исследований;

– величина ОГ не связывается с количественными характеристиками формы рудного тела.

Отмеченные затруднения в некоторой мере устраняются, если величина ошибок геометризации определяется на аналитической основе, то есть в виде формул, выражающих связь этого показателя с параметрами сети и морфологическими характеристиками объекта.

В работах В.А. Викентьева и П.И. Кушнарера [13] было показано, что ошибка геометризации в сечении или разрезе теоретически может быть определена исходя из его размера (средней длины) по какому-либо направлению с учетом шага сети:

$$\delta(A) = 100 * A/4L (\%) \quad (4.5)$$

где  $A$  – шаг сети по заданному направлению,

$L$  – средние размеры объекта по данному направлению.

Приведенное выражение относится к относительно простым случаям, предполагающим наличие одного рудного тела, для которого выполняется оконтуривание.

В более сложных случаях объектом геометризации может служить совокупность сближенных тел, для которых проявляется эффект «взаимного перекрытия контуров». Для таких ситуаций также имеется аналитическая оценка ошибок геометризации [9-11].

Для практического применения она представляет незначительный интерес, так как характеризует область относительно высоких значений этого показателя.

Существует аналитическое выражение для оценки ошибок геометризации в случае оконтуривания рудных тел в проекции, которое [8] имеет вид:

$$\delta_{(A,B)} = 100 * \left[ (A/4L_{cp})^2 + (B/4H_{cp})^2 \right]^{0.5} (\%) \quad (4.6)$$

где  $A$  и  $B$  – шаг сети по падению и простиранию;

$L_{cp}$  и  $H_{cp}$  – средние размеры рудных тел по падению и простиранию.

Отношение  $H_{cp}/L_{cp}$  характеризует коэффициент анизотропии формы. Сходным образом изучается анизотропия в сечениях для штокверкоподобных и трубообразных рудных тел. Корректное определение значения ошибки геометризации по выражению (4.6) обеспечивается при соответствии удлинения сети показателю анизотропии формы объекта.

Использование аналитических выражений облегчает оценку ошибок геометризации, однако не решает ее в полной мере, особенно на ранних стадиях геологоразведочных работ, когда сведения о морфологических показателях оруденения практически отсутствуют. Это обстоятельство послужило причиной ограниченного использования данного критерия для выбора параметров разведочной сети и квалификации запасов.

### 4.3 Принципы выбора параметров сети в зарубежных стандартах

Результатом оценки разведанности запасов/ресурсов как в нашей стране, так и за рубежом, является их разделение на категории. В зарубежных стандартах общепринятой является классификация, изложенная в стандарте JORC [96]. Можно отметить, что в этом и в других зарубежных стандартах отсутствуют группировки месторождений по сложности строения и обобщения, ориентирующие на выбор параметров разведочной сети.

Анализ материалов по оценке месторождений, выполненных зарубежными специалистами и аудиторами, а также публикации, касающиеся квалификации запасов/ресурсов [95, 98-100], позволяют заключить, что для определения степени разведанности ресурсов используются следующие основные подходы:

- качественные оценки, в которых ведущую роль играет опыт компетентного лица; определенное значение при этом имеют обобщения, представляемые в обзорах как «best practices»;
- количественные методы, опирающиеся на изучение изменчивости признаков и использование вариограмм.

Аналогичный вывод содержится в работе А.Е. Александровой и Д.А. Куликова [1], в которой представлен обзор методов классификации запасов за рубежом.

В работах зарубежных авторов теоретические вопросы обоснования параметров разведочной сети практически не рассматриваются, в них больше уделяется внимание квалификации запасов/ресурсов относительно уже созданной сети. В отличие от отечественной практики изучения месторождений, за рубежом достаточно часто делается акцент на опережающее создание участков детализации, анализ результатов по которым используется для корректировки параметров разведочной сети.

Подход к определению разведанности, опирающийся на оценку точности определения геологоразведочных параметров, обсуждается в публикациях за рубежом достаточно давно. В то же время можно отметить, что количественные оценки разведанности ресурсов/запасов применяются, как правило, для месторождений определенных промышленных типов и в рамках подходов, принятых крупными горнодобывающими компаниями. Единообразные требования к критериям и определению их предельной величины для запасов разных категорий не установлены, рекомендации для их широкого применения в регулирующих документах не приводятся.

Понятие «ошибка геометризации» как критерий, позволяющий осуществлять выбор параметров разведочной сети на количественной основе, в зарубежных стандартах не фигурирует. В определенной степени в качестве аналога для него можно рассматривать понятие continuity, содержащееся в стандарте JORC, которое можно принимать как характеристику



надежности увязки оруденения. Вместе с тем это понятие не имеет определенного численного выражения, что осложняет его использование.

Наиболее распространенным приемом по определению достаточности имеющейся разведочной сети для квалификации запасов по требуемой категории является использование вариограмм. Основная идея этого подхода состоит в том, что по вариограмме определяется расстояние (range или предел корреляции), при котором она выходит на пороговые значения (sill). Далее по нормированным значениям вариограмм оцениваются расстояния между разведочными пересечениями, при которых ресурсы могут квалифицироваться по той или иной категории. Однозначно принципы оценки этих расстояний не определены и несколько расходятся в разных отчетах и публикациях.

Например, Г. Паркер [99] предлагает считать (Рисунок 4.6), что расстояния между пересечениями, соответствующие нормированным значениям вариограммы менее 0.6, позволяют оценивать ресурсы по категории *measured*; на приведенной схеме это расстояние равно примерно 60 м. Предельным расстоянием (шагом сети), достаточным для квалификации ресурсов по категории *indicated*, будет считаться 100 м, ему соответствует нормированное значение вариограммы 0.8. Для оценки ресурсов категории *inferred* в рамках такого подхода может использоваться шаг сети, не превышающий предела корреляции или увеличенный относительно него на 10 % - 20 %. В приведенном примере максимальный шаг сети для этой категории ресурсов может составлять около 220 м.

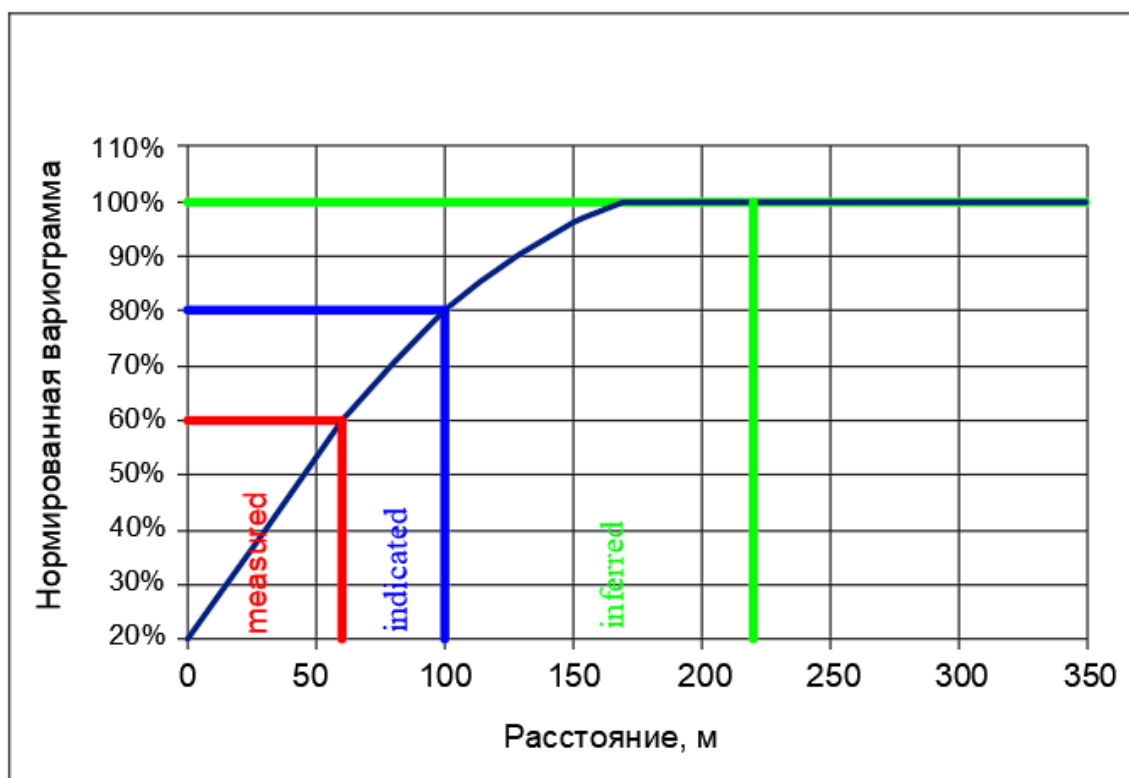


Рисунок 4.6 – Схема определения шага разведочных пересечений для ресурсов разных категорий с использованием вариограммы (по Г. Паркеру)

В тех случаях, когда в строении объекта проявлена анизотропия, что проявляется в различии вида вариограмм по падению и простиранию, параметры сети и размеры разведочной ячейки выбираются с учетом этого обстоятельства.

Дополнительно для определения категории ресурсов привлекается количество проб и пересечений, участвующих в интерполяции содержаний в ячейки моделей.

Теоретическое обоснование рассмотренного подхода в публикациях не встречено. Вместе с тем им может служить представление о том, что вариограммы характеризуют размеры элементов неоднородности, определяющих закономерные изменения признака. Таким образом, использование сети с шагом, учитывающим размер этих неоднородностей, будет заведомо обеспечивать «непрерывность» прослеживания оруденения на отдельных участках и получение ресурсов требуемых категорий.

Описанный подход обладает рядом недостатков, основными из которых являются;

- сложности использования на ранних стадиях геологоразведочных работ, когда надежное определение характеристик вариограмм невозможно из-за недостатка информации, особенно по участкам детализации;

- отсутствие теоретического обоснования и анализа его влияния на показатели освоения месторождения;

- неопределенность связи параметров сети с точностью оценки геологоразведочных параметров.

Оценка разведанности с использованием вариограмм была встречена в отдельных отчетах по аудиту ресурсов отечественных месторождений. Сравнение параметров сети, используемых для квалификации запасов категории  $C_1$  и сопоставимой с ней категорией *indicated*, показывает, что требования к плотности сети в зарубежных стандартах являются несколько более «жесткими».

На основе анализа приемов обоснования геометрии разведочной сети, изложенных в разделах 4.1 - 4.3 можно сделать следующие выводы:

- 1) В настоящее время отсутствуют обоснованные и общепринятые количественные подходы к обоснованию геометрии разведочной сети, используемые как зарубежными, так и российскими специалистами.

- 2) Зарубежные специалисты фактически ориентированы на более «жесткую» оценку достаточности разведочной сети и разведанности запасов в сравнении с российской практикой.

- 3) Зарубежные и российские специалисты используют близкие по сущности подходы, что позволяет надеяться на определение общих позиций при выборе параметров сети и оценке разведанности месторождений.

#### **4.4 Предложения по совершенствованию обоснования разведочной сети**

На основе анализа подходов к изучению свойств полезного ископаемого и требований к квалификации запасов разработана концепция обоснования геометрии разведочной сети, базирующаяся на количественных критериях разведанности. Особое внимание уделено возможности определения плотности сети на ранних стадиях геологоразведочных работ. С этой целью используются современные достижения в области изучения природных объектов, в том числе положения теории фракталов.

Одним из ключевых положений предлагаемой концепции является учет масштаба изучаемого объекта, который осуществляется через ожидаемую или существующую производительность горнодобывающего предприятия, а также оценка изменчивости свойств оруденения, в том числе содержаний полезного компонента применительно к пробам равной длины или композитам. Сложность строения объектов определяется с учетом фрактальной размерности рудных образований. С этих позиций предлагаемые подходы существенным образом отличаются от приемов обоснования сети, применявшихся ранее.

Количественное обоснование разведочной сети является наиболее объективным и надежным, оно позволяет осуществлять дифференцированный выбор ее параметров для отдельных залежей и участков (доменов), различающихся степенью изменчивости и морфологическими особенностями, на разных стадиях геологоразведочного процесса.

Все существующие в настоящее время количественные методы обоснования разведочной сети можно разделить на группы по типу критерия разведанности, лежащего в основе их применения. На основе проведенного ранее анализа в качестве таких критериев предлагается использовать величину погрешности определения запасов, особенно средних содержаний компонентов, и ошибки геометризации. Величина критерия устанавливается отдельно для каждой категории.

##### **4.4.1 Обоснование параметров сети с позиций погрешности оценки запасов**

Для золоторудных месторождений ведущей характеристикой, определяющей их разведанность, является изменчивость геологоразведочных параметров, среди которых особое положение занимает содержание полезного компонента (ПК).

Изменчивость мощности рудного тела влияет на погрешность оценки объемов подсчетных блоков. Как показано в ряде работ [2, 38, 44] относительные ошибки в оценке мощности при одинаковой геометрии разведочной сети в несколько раз (5 - 8) меньше, чем относительные ошибки в оценке других параметров. Из этого следует, что роль ошибок в определении средней мощности в общей оценке разведанности объекта относительно невелика.

Наличие их достаточно легко компенсируется в процессе эксплуатации отработкой дополнительных блоков или переработкой руды, накопленной на усреднительных складах.

Ошибки в определении средних содержаний по подсчетным блокам сразу сказываются на экономических показателях эффективности отработки месторождения, в связи с чем их допустимый уровень должен регламентироваться особенно «жестко». Для маломощных пластообразных и жильных объектов, наряду с изменчивостью содержаний, следует исследовать изменчивость метрограмма или продуктивности, которая в максимальной степени определяет оценку запасов по подсчетным блокам.

Исходные замеры содержаний осуществляются по пробам, что позволяет использовать их для проведения объективных статистических расчетов. В ряде случаев при различиях в длине проб предварительно необходимо проводить их композитирование, то есть приведение к фиксированному интервалу. Отмечаются ситуации, когда оконтуривание оруденения производится по группам разведочных проб, относящихся к эксплуатационному уступу, в этом случае изменчивость следует оценивать по таким композитам.

Предлагаемая процедура аналитического расчета параметров разведочной сети [53] базируется на следующих основных положениях:

- изменчивость содержаний или метрограммов оценивается для рудных тел, оконтуренных по установленным кондиционным показателям;
- характеристики изменчивости: дисперсия, коэффициент вариации определяются по пробам или композитам;
- погрешность оценки геологоразведочных параметров относится к объемам недр, сопоставимым с годовой или квартальной (категория В) производительностью предприятия;
- оценка погрешности определения средних значений параметров для категории  $C_1$  может проводиться по «случайной» схеме, без учета вида распределения и влияния закономерной компоненты;
- расчеты проводятся относительно заданной категории запасов при установленных допустимых значениях погрешности определения.

Получение необходимой для расчетов информации возможно уже на ранних стадиях геологоразведочных работ, в связи с чем они могут проводиться при проектировании как оценки, так и разведки.

Алгоритм обоснования параметров сети с привлечением количественного подхода включает следующие операции:

- определение производительности предприятия на основе масштаба оруденения по формуле Тейлора [84] или по результатам разработки ТЭО временных кондиций;

- определение с учетом величины объемной массы объема блока, соответствующего годовой производительности;
- оценка вариабельности содержаний по пробам или композитам, проведение по возможности геостатистических исследований;
- выбор значения погрешности оценки, достаточной для квалификации запасов по определенной категории;
- расчет необходимого числа проб на подсчетный блок, соответствующий годовой производительности рудника;
- расчет рудного объема, приходящегося на одну пробу;
- определение средней длины пробы или композита в пересчете на направление истинной мощности;
- определение площади ячейки сети как отношение единичного объема к средней длине пробы или композита;
- оценка геометрии сети (расстояние между разрезами и пересечениями на разрезе) с учетом величины коэффициента анизотропии.

Оптимальный срок (Т) отработки месторождения предварительно определяется по формуле Тейлора:

$$T = 6.5^4 \sqrt{Q} \quad (4.7)$$

где Q – балансовые запасы руды в млн т.

Годовая производительность предприятия (А) рассчитывается как отношение запасов руды к сроку отработки:

$$A = Q/T \quad (4.8)$$

Использование формулы Тейлора позволяет обеспечить однообразие расчетов и возможность объективного сравнения объектов по полученным результатам. Вместе с тем в расчетах может приниматься и производительность, установленная в горнотехнической части ТЭО временных кондиций.

Оценка вариабельности по пробам (дисперсия и коэффициент вариации) выполняется по стандартной процедуре через квадраты отклонений частных замеров от среднего значения.

Выборка должна включать пробы по рудным интервалам, выделенным по установленному или принятому бортовому содержанию. Несоответствие распределения нормальному закону представляется несущественным, поскольку в конечном итоге рассматривается дисперсия или погрешность оценки среднего выборочного значения; в соответствии с законом больших чисел [2, 41, 77] эти параметры «нормализуются» при

увеличении числа наблюдений. Аналогичным образом на оценке погрешности не сказывается «усеченность» распределений, обусловленная использованием кондиций.

Влияние на величину случайной составляющей дисперсии закономерных изменений признака определяется по вариограммам. Нежелательным свойством выборки для оценки дисперсии является высокий коэффициент корреляции между соседними пробами, поскольку наличие такой взаимосвязи требует введения определенных поправок. Снижение влияния этого эффекта возможно через композитирование проб, то есть через пересчет содержаний на определенную, повышенную длину. Отсутствие связности признака по точкам наблюдений позволяет рассматривать выборку как случайную и дает возможность пользоваться известными формулами математической статистики для вычисления погрешности оценки его средних значений.

При выборе допустимого значения погрешности оценки запасов необходимо учитывать, что в расчетах с использованием формул математической статистики принимается относительное среднеквадратическое отклонение ( $S_{отн}$ ) или величина доверительного интервала ( $\lambda = t * S_{отн}$ ).

В отечественной разведочной литературе ранее обсуждалась допустимая величина погрешности, которую следует рассматривать как относительную среднеарифметическую ошибку ( $\Delta$ ), в то время как в зарубежных публикациях в основном рассматривается относительное среднеквадратическое отклонение ( $S_{отн}$ ) и определяемая по нему величина интервала  $\lambda$  при заданной доверительной вероятности. Соотношение между величинами  $\Delta$  и  $S_{отн}$  характеризуется выражением:

$$\Delta = 0.8 * S_{отн} \quad (4.9)$$

В дальнейших расчетах будет использоваться относительное стандартное отклонение ( $S_{доп}$ ), из которого легко получить другие формы представления этого критерия.

Расчет необходимого числа наблюдений/разведочных проб ( $N$ ) в общем случае выполняется по известным формулам математической статистики:

$$N = (t_{\alpha} * V)^2 / S_{доп}^2 \quad (4.10)$$

где  $t_{\alpha}$  – значение критерия Стьюдента при выбранной доверительной вероятности;

$V$  – коэффициент вариации содержаний по пробам или композитам;

$S_{доп}$  – допустимое относительное стандартное отклонение, вычисляемое как  $\Delta/0,8$ ;

В связи с тем, что для обоснования параметров сети предлагается использовать непосредственно относительное стандартное отклонение, значение критерия Стьюдента принимается равным 1.

Объем участка недр, соответствующего годовой производительности предприятия (БГП), вычисляется с учетом величины объемной массы, установленной на месторождении.

Для проведения расчетов используется длина пробы или композита, пересчитанная на истинную мощность. С этой целью могут использоваться сведения об усредненных условиях залегания рудных тел и ориентировке осей разведочных выработок и скважин. В случае, когда геостатистическим анализом по мощности рудного тела однозначно выявляются закономерности, для снижения их влияния на оценку дисперсии рекомендуется проводить пересчет содержаний на композиты, длина которых составляет  $1/5 - 1/10$  средней длины рудного тела. Далее исследования изменчивости выполняются применительно к композитам.

Объем, приходящийся на одну пробу, вычисляется как отношение объема БГП к необходимому числу проб. Площадь, которая должна приходиться на одну пробу или композит (площадь ячейки сети), вычисляется делением единичного объема на истинную длину пробы или композита.

Параметры разведочной ячейки – шаг пересечений по простиранию и падению – вычисляются с учетом анизотропии свойств объекта. Обычно на золоторудных месторождениях [44] коэффициент анизотропии составляет 1 - 2, редко до 5.

Для практического применения и наглядного представления результатов расчетов могут быть использованы диаграммы, с помощью которых осуществляется выбор площади разведочной ячейки для объектов различного масштаба и с разными значениями коэффициентов вариации содержаний по пробам. На представленных примерах сеть выбирается при средней (истинной) длине проб – 1 м.

Исследования изменчивости на ряде золоторудных месторождений показали, что коэффициенты вариации содержаний по пробам могут меняться в широких пределах, основной диапазон изменений составляет 150 % - 500 %. Расчеты параметров сети могут быть проведены для любых значений коэффициентов вариации, однако для демонстрации возможностей данного подхода были выбраны значения 150 %, 200 %, 250 %, 300 %, 350 % и 450 %.

В качестве «базовой» категории для демонстрации методики расчетов принята категория  $C_1$  как наиболее востребованная при разведке золоторудных месторождений. Остальные категории относительно нее могут оцениваться по более редким или густым сетям, различия в размере ячеек по площади обычно достигают 4-х раз.

Изменения площади разведочной ячейки в зависимости от масштаба месторождения (ожидаемой производительности горнодобывающего предприятия) и степени изменчивости содержаний удобно отобразить на номограммах (Рисунок 4.7 - 4.9). Номограммы построены для разных допустимых стандартных отклонений (ДСО). Уровень ДСО, равный 10 %, принят как наиболее приближенный к предложениям зарубежных исследователей для категории ресурсов *indicated*; остальные значения ДСО: 12.5 % и 15 %, – являются близкими к фактическим погрешностям оценки запасов категории  $C_1$  на отечественных месторождениях.

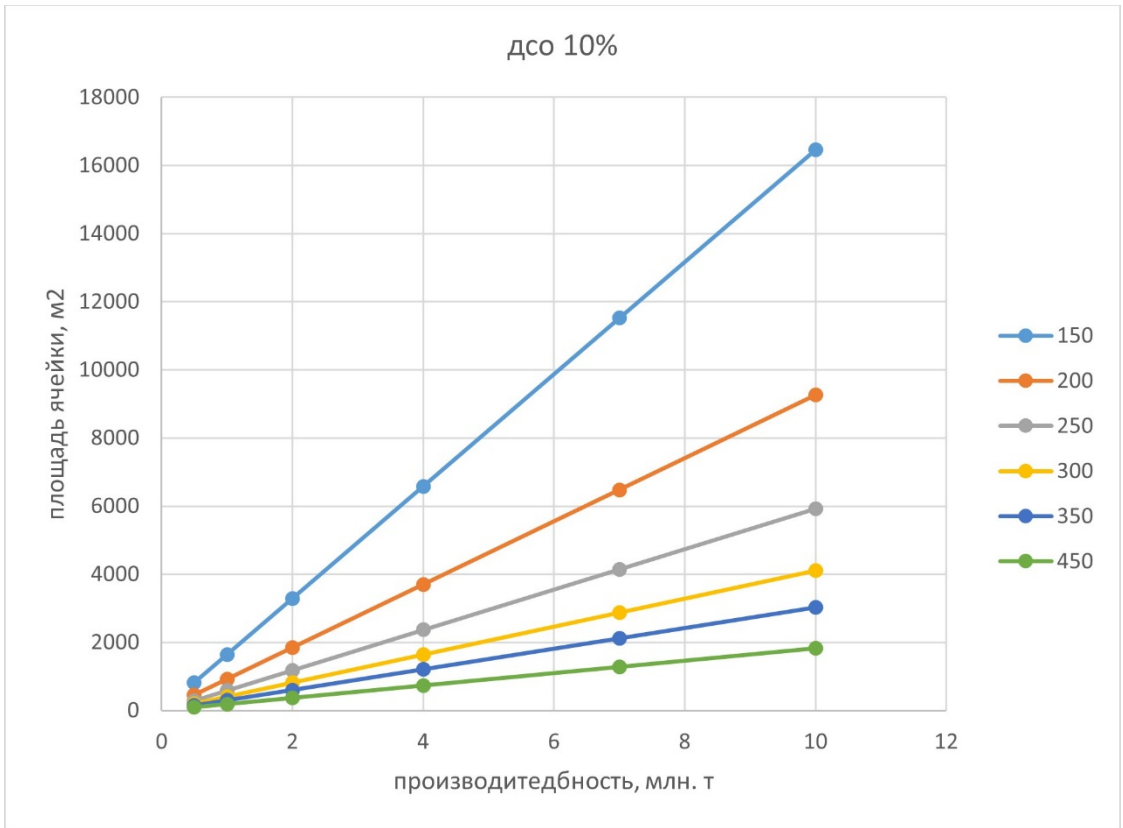


Рисунок 4.7 – Площади ячейки сети при допустимой погрешности 10 % (категория С1) в диапазоне мелкие – крупные месторождения при разных значениях коэффициентов вариации (указаны цветами в диапазоне от 150 % до 450 %)

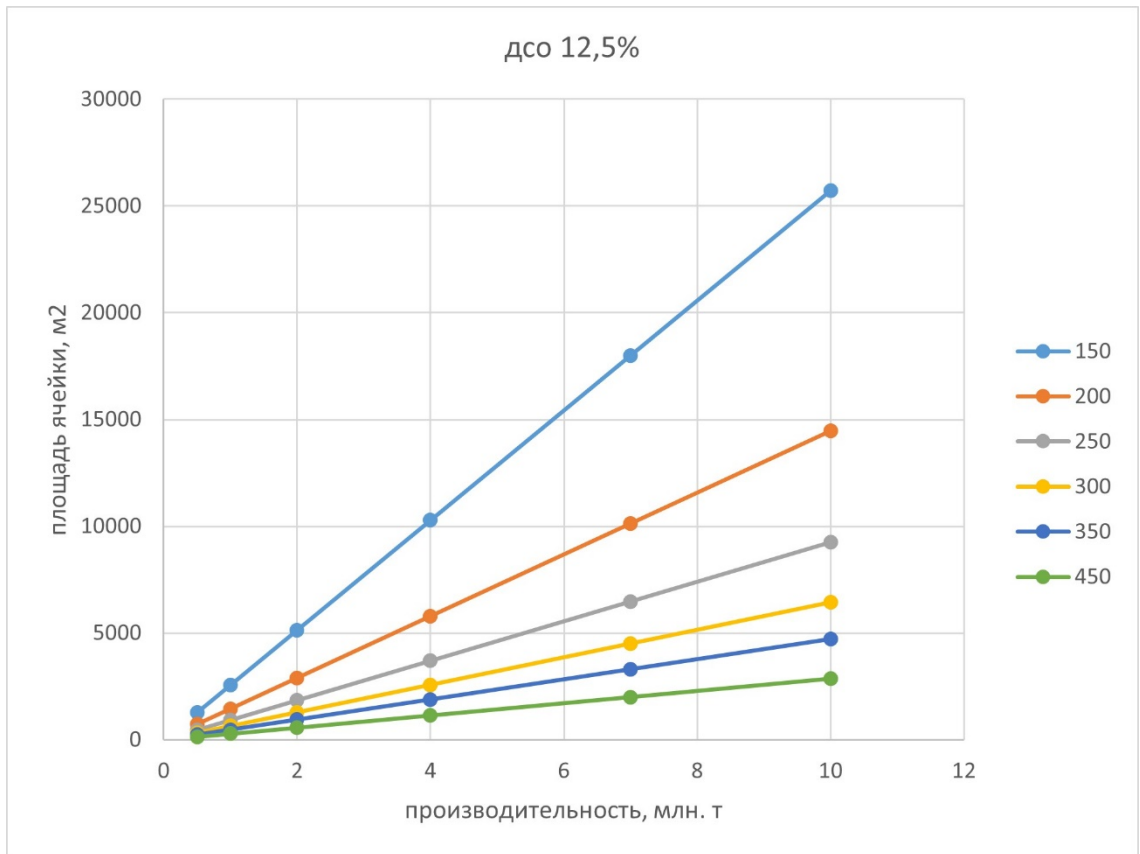


Рисунок 4.8 – Площади ячейки сети при допустимой погрешности 12.5 % (категория С1) в диапазоне мелкие – крупные месторождения при разных значениях коэффициентов вариации



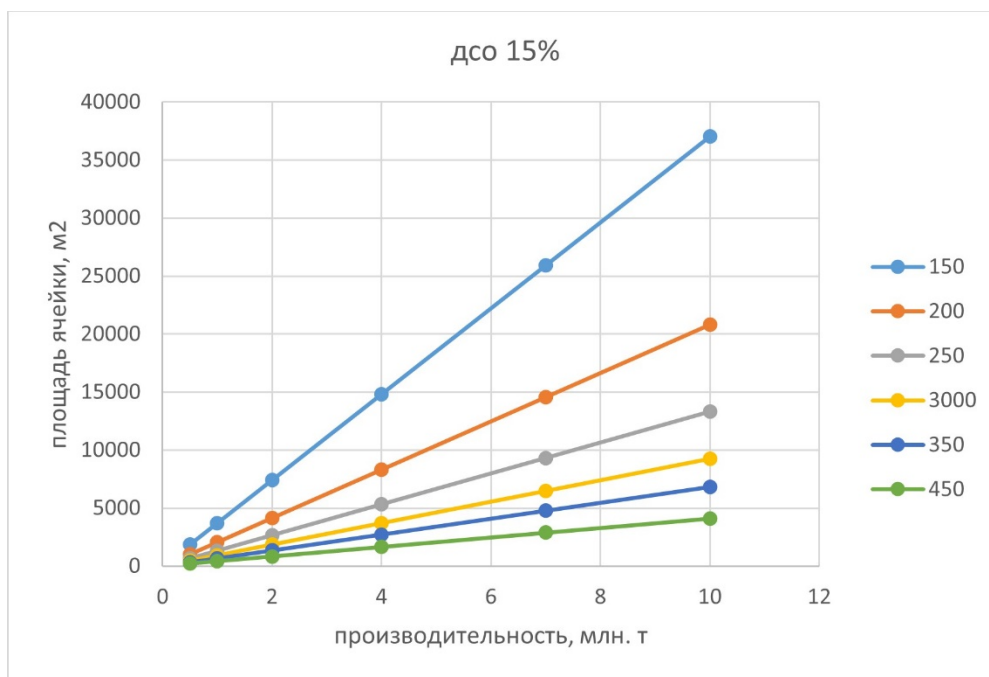


Рисунок 4.9 – Площади ячейки сети при допустимой погрешности 15 % (категория  $C_1$ ) в диапазоне мелкие – крупные месторождения при разных значениях коэффициентов вариации

Из приведенных выше данных следует, что расчетные параметры сети наиболее чувствительны к уровню изменчивости содержания золота в пробах.

На основе представленных графиков можно выделить области низкой изменчивости признака (коэффициент вариации менее 150 %), средней изменчивости (коэффициент вариации 150 % - 250 %) и высокой изменчивости (коэффициент вариации более 250 %). Эти градации могут быть использованы при разделении объектов по сложности строения. Другим классификационным признаком безусловно являются размеры рудных тел, что отражается в масштабе объекта и проектной/фактической производительности предприятия. Предложенный подход к обоснованию параметров сети обладает следующими преимуществами перед предлагавшимися ранее:

- позволяет дифференцированно учитывать свойства оруденения как по разным объектам, так и по участкам в пределах одного объекта;
- дает возможность рассматривать различные требования к погрешности оценки запасов;
- может быть использован на ранних стадиях работ;
- позволяет оценивать достаточность имеющейся сети для квалификации запасов по заданной категории при изменении условий отработки и свойств объекта.

#### 4.4.2 Обоснование сети с использованием метода разрежения

Разрежение разведочной сети является одним из распространенных методов обоснования ее геометрии. Данный метод также базируется на количественной оценке погрешности

определения геологоразведочных параметров. Для его применения требуется наличие участка детализации, что не всегда обеспечивается в реальных ситуациях, особенно на ранних стадиях геологоразведочных работ.

В сравнении с другими подходами по своим результатам этот метод обладает следующими преимуществами:

- не зависит от имеющейся статистической модели распределения;
- отражает природные особенности, в том числе изменчивость свойств объекта;
- допускает совместное исследование всех геологоразведочных параметров: содержаний, запасов руды, запасов металла;
- характеризует действительную связь между критерием разведанности и параметрами сети.

Опыт исследований на основе данного метода показывает, что его эффективность была относительно низкой, что объясняется отсутствием единых подходов к интерпретации полученных результатов. Трудности в его использовании определяются:

- разнообразием исходных данных, в том числе размеров участков детализации и плотностью исходной сети;
- неопределенностью представительности участка детализации;
- неопределенностью объемов недр, на которые должны распространяться полученные результаты;
- отсутствием единой методики проведения расчетов;
- отсутствием требований к предельным значениям критериев разведанности для запасов определенных категорий.

В данном разделе описываются приемы корректировки результатов разрежения сети с учетом различий в размерах участков детализации относительно годовой производительности предприятия.

Целью разрежения разведочной сети является определение погрешности оценки запасов, в том числе содержаний полезного компонента. Опыт анализа результатов разрежения сети, представляемых в отчетах с подсчетом запасов, показывает, что они обладают рядом недостатков. В числе наиболее типичных ошибок следует отметить:

- принятие за «истинные» значений параметров, вычисленных по участку детализации, без учета ошибок в их определении (собственных ошибок модели);
- рассмотрение ограниченного числа вариантов наложения разреженной сети.

Следствием первой ошибки является занижение погрешности в оценке параметров. Вторая ошибка приводит к неверным заключениям типа: *разрежение сети в 2 раза приводит к*

увеличению содержаний на 30 %. В действительности такая ситуация характеризует только один вариант наложения редкой сети, при других вариантах картина может меняться на диаметрально противоположную.

Существенным осложнением, делающим результаты разрежения неопределенными, является различие размеров участков детализации и использование в исследованиях разного количества пересечений и проб. Очевидно, что участие в разрежении большого количества данных приводит к снижению погрешности оценки параметров по вариантам.

При оценке погрешности определения параметров для каждого варианта разрежения сети традиционно [2] рассчитываются абсолютные отклонения, на основе которых вычисляется средняя арифметическая ошибка, а затем относительная ошибка. Расчет производится по выражениям:

$$\Delta_i = X_i - X_{\text{ср}} \quad (4.11)$$

$$\Delta_{\text{ср}} = \sum \Delta_i / N \quad (4.12)$$

$$\Delta_{\text{отн}} = \Delta_{\text{ср}} / X_{\text{ср}} \quad (4.13)$$

где  $X_i$  – среднее значение признака по  $i$ -ому варианту наложения сети;

$X_{\text{ср}}$  – среднее значение признака по участку детализации;

$\Delta_i$  – разность значений признака по варианту наложения и по участку;

$N$  – число вариантов наложения сети;

$\Delta_{\text{отн}}$  – средняя относительная ошибка по варианту разрежения сети.

Следует отметить, что использование выражения (4.12) для вычисления  $\Delta_{\text{ср}}$  недостаточно корректно, в нем не учитывается количество проб, попавших в каждый вариант наложения. Кроме того, величина относительной арифметической ошибки не согласуется с представлением допустимой погрешности оценки в виде стандартного отклонения ( $S_{\text{отн}}$ ). Для приведения их в соответствие следует использовать выражение (4.9):  $\Delta_{\text{отн}} = 0,8 * S_{\text{отн}}$ .

В связи с отмеченными недостатками и отсутствием единого подхода к применению данного метода предлагается обновленная процедура проведения исследований по разрежению разведочной сети и интерпретации ее результатов. В ее основе лежат следующие основные положения:

- погрешности оценки по результатам разрежения рассматриваются относительно рудных объемов недр, сопоставимых с годовой производительностью предприятия;
- ошибки в оценке параметров по вариантам разрежения должны выражаться в виде относительных стандартных отклонений;
- при разрежении сети необходимо рассматривать все варианты ее наложения на исходную модель;

– при анализе результатов разрежения требуется учет собственной ошибки модели.

Особенности применения предложенной процедуры расчетов могут быть рассмотрены на примере золоторудного месторождения [49], представленного пологозалегающими рудными телами. Исследования проводились на участке детализации, где была создана сеть скважин колонкового бурения 15×15 м (Рисунок 4.10).



Рисунок 4.10 – План участка детализации с контурами (синий цвет) рудных тел в проекции на горизонтальную плоскость

Всего на участке пробурено 318 скважин, было выделено 174 рудных интервала, в которые попало 2237 проб. Коэффициент вариации содержаний по пробам составил 252 %. Средняя мощность рудных интервалов равна 12,9 м, коэффициент вариации мощности – 63,5 %. Коэффициент вариации метрограмма по рудным интервалам – 73,3 %. Отбор проб осуществлялся по интервалам длиной 1 м. Годовая производительность предприятия составляет 1000 тыс. тонн Объемная масса руд – 1,84 т/м<sup>3</sup>. В результате подсчета запасов по участку детализации установлены следующие параметры: запасы руды – 921,5 тыс. т, запасы золота – 2013,7 кг при среднем содержании 2,185 г/т.

Собственные относительные ошибки параметров модели определяется через их коэффициенты вариации и число (N) замеров:

$$S_{\text{мод}} = V/\sqrt{N} \quad (4.14)$$

По результатам разрежения для каждого варианта геометрии сети определяется среднее относительное отклонение, которое затем делением на 0,8 пересчитывается в относительное стандартное отклонение ( $S_{\text{разр}}$ ). Итоговая дисперсия и относительное стандартное по варианту сети рассчитывается через сумму дисперсий:

$$D_{\text{вар}} = D_{\text{разр}} + D_{\text{мод}} \quad (4.15)$$

$$S_{\text{вар}} = \sqrt{D_{\text{вар}}} \quad (4.16)$$

Эксперименты по разрежению сети были проведены для ячеек размером 15×30, 30×30 и 30×60 м. Расчеты по вариантам выполнены для содержаний, запасов руды и запасов золота. Предварительно, исходя из выражения (4.14), для каждого из параметров вычислены собственные относительные ошибки модели. По каждому варианту определены средние относительные отклонения по выражению (4.11), относительные стандартные отклонения (по выражению (4.13)) и итоговые стандартные отклонения для варианта в соответствии с выражениями (4.15) и (4.16). Результаты расчетов приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Определение погрешностей оценки параметров по вариантам разрежения сети

Сеть	Показатель	Вар-ты	Содержание	Зап. Руды	Зап. Au
Исходная 15×15	отн. ошибка модели		0,0533	0,0482	0,0556
15×30	среднее отн. отклон	2	0,0048	0,0354	0,0305
	отн. станд. отклон.		0,0060	0,0443	0,0382
	станд. откл. вар-та		<b>0,0536</b>	<b>0,0642</b>	<b>0,0674</b>
30×30	среднее отн. отклон	4	0,0182	0,0740	0,0543
	отн. станд. отклон.		0,0227	0,0926	0,0679
	станд. откл. вар-та		<b>0,0579</b>	<b>0,1043</b>	<b>0,0878</b>
30×60	среднее отн. отклон	8	0,0371	0,1062	0,1013
	отн. станд. отклон.		0,0464	0,1327	0,1266
	станд. откл. вар-та		<b>0,0707</b>	<b>0,1472</b>	<b>0,1383</b>

Полученные по каждому варианту сети относительные стандартные отклонения характеризуют погрешности оценки параметров по участку детализации, запасы которого несколько меньше количества руды, соответствующей годовой производительности предприятия. Это несоответствие требует введения поправок ( $K_{\Pi}$ ), которые определяются как:

$$K_{\Pi} = \sqrt{(Q_{\text{уч}}/Q_{\text{гп}})} \quad (4.17)$$

где  $Q_{\text{уч}}$  – запасы руды на участке детализации;

$Q_{\text{гп}}$  – запасы, соответствующие годовой производительности предприятия.

В данном случае величина поправки составит  $K_{\Pi} = \sqrt{(921.5/1000)} = 0.96$ .

Итоговые погрешности оценки запасов с учетом поправок за несоответствие количества запасов приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Погрешности оценки параметров по вариантам разрежения сети

Сеть	Содержание	Зап. Руды	Запасы Au
15 × 30	0,0515	0,0616	0,0647
30 × 30	0,0513	0,1001	0,0843
<b>30 × 60</b>	<b>0,0679</b>	<b>0,1413</b>	<b>0,1328</b>

Из результатов разрежения следует, что для оценки запасов категории  $C_1$  на данном месторождении может быть рекомендована сеть пересечений 30×60 м с площадью ячейки 1800 м<sup>2</sup>. В этом случае обеспечивается оценка запасов с погрешностью: для содержаний – менее 6,8 %, для запасов руды – 14,1 % и для запасов металла – 13,3 %.

Полученные рекомендации можно сопоставить с выводами, основанными на данных аналитического расчета. Годовая производительность 1000 тыс. тонн руды соответствует ее общему объему 543,5 тыс. м<sup>2</sup>. Если принять, что при разрежении сети до 30×60 м количество проб сократилось в 8 раз, то их количество в блоке годовой производительности (с учетом поправок за несоответствие объемов) должно составить 303 шт. Погрешность оценки средних содержаний в соответствии с выражением (4.17) в этом случае составит 14,45 %.

Выводы, полученные тем и другим методом, достаточно хорошо совпадают по конечным результатам – возможности использования сети 30×60 м для оценки запасов категории  $C_1$ . Можно также отметить, что полученная оценка погрешности для содержаний согласуется с погрешностями для запасов руды и металла.

#### 4.4.3 Оценка ошибок геометризации на основе положений фрактальной геометрии

Условия определения и применения ошибок геометризации рассмотрены в главе 4, раздел 4.2.2. Отмечено, что при использовании эмпирических и аналитических методов «истинные» характеристики формы устанавливаются по сечениям (горизонтам, разрезам) или проекциям с

предельно высокой плотностью наблюдений. Для открытых горных работ «шкала измерений» обычно составляет  $(4-5) \times (4-6)$  м (сеть сопровождающей эксплуатационной разведки), для подземных горных работ она может сокращаться до  $(1.5-2) \times (2-4)$  м.

На начальных стадиях геологоразведочных работ «истинная» форма рудных тел и ее характеристики при отсутствии участков детализации остаются неизвестными, что практически исключает возможность применения описанных эмпирических и аналитических приемов оценки ошибок геометризации (ОГ) с целью обоснования параметров разведочной сети.

Задача определения величины этого показателя на ранних стадиях геологоразведочных работ может решаться на основе положений *фрактальной геометрии*. Исходными данными для проведения расчетов являются:

- значение меры Хаусфора  $D$  для исследуемого объекта;
- параметры предельно плотной сети, достаточной для надежного оконтуривания руды на стадии отработки.

Фрактальная размерность  $D$  оценивается по аналогии на основе определения морфологического типа объекта и особенностей его строения. Значения этого показателя, определенные для месторождений различных морфологических типов, указаны в главе 2, Таблица 2.6.

Размеры (шаг  $a$ ) предельно плотной сети – сети сопровождающей эксплуатационной разведки – также принимается по аналогии с учетом ожидаемой производительности рудника и горнотехнических условий отработки. В значительном числе случаев для открытой отработки он может составлять от 4 до 5 м.

Для расчетов величины ошибки геометризации могут быть предложены взаимосвязанные способы, применение каждого из которых диктуется конкретными условиями. Одним из них является оценка величины ОГ для выбранной сети через фактические (разведочные) размеры рудных тел. Он применяется в том случае, когда уже имеются участки, разведанные по относительно плотной сети, позволяющей выполнять оконтуривание рудных тел (Рисунок 4.11). В этом случае по установленным рудным интервалам проводятся их границы как сплошных образований без включения в контуры безрудных участков. При оконтуривании необходимо в максимальной степени учитывать особенности геологического строения и положение рудоконтролирующих структур.

На таких участках существует возможность измерения фактической средней длины рудного тела по направлению падения  $L_{\text{факт}}$  (штриховка на рисунке) при данном шаге сети.

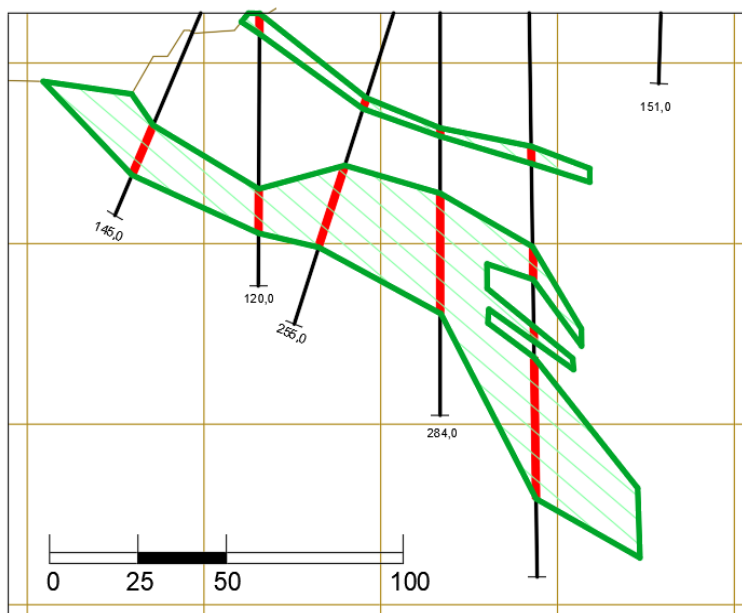


Рисунок 4.11 – Представления о форме рудных тел по данным ГРП в разрезе

Проведенные исследования по сравнению размеров тел, определенных при разной базе измерений (шаге сети), с их «истинными» размерами позволили установить, что между ними существуют соотношения, связанные с величиной фрактальной размерности. Это обстоятельство дает возможность установить величину поправочного коэффициента для приведения фактических замеров к «истинным» размерам тел. В общем виде его значение определяется по выражению:

$$K_{\text{попр}} = D^{0.25 \cdot A/a} \quad (4.18)$$

где  $D$  – фрактальная размерность;

$A$  – шаг сети, для которой определяется ошибка геометризации;

$a$  – шаг предельно плотной сети.

«Истинная» длина рудного тела по заданному направлению определяется из выражения:

$$L_{\text{попр}} = L_{\text{факт}} / K_{\text{попр}} \quad (4.19)$$

Например, объект, отмеченный на рисунке 4.11, относится к морфологическому типу минерализованных зон, для которого величина размерности Хаусдорфа составляет в среднем 1,35. Средняя длина рудного тела, определенная по разведочному контуру, составила для него 59,3 м.

При среднем шаге сети 40 м и шаге предельно плотной сети сопровождающей эксплуатационной разведки 5 м соотношение  $A/a$  будет равно 8. Величина поправочного коэффициента составит:  $K_{\text{попр}} = D^{0.25 \cdot 8} = 1,35^2 = 1,8$

Таким образом, ожидаемая истинная длина рудного тела по падению с учетом поправки будет равна:  $L_{\text{попр}} = 59,3/1,8$ .



Ошибка геометризации  $\delta$  (А) вычисляется по аналитическому выражению (4.5). В данном случае она составит:  $\delta(A) = 100 \cdot 40 / 4 \cdot 33 = 30,3 \%$ .

Для оценки корректности предложенной процедуры проведены эксперименты с объектами, для которых имелись участки детализации и возможность оценить «истинные» средние размеры рудных тел при предельном шаге 5 м. Для этих же объектов по разреженной сети (шаг от 75 до 20 м) оценены средние размеры рудных тел, в том числе средняя длина по «разведочному» контуру. С учетом величины фрактальной размерности  $D$  рассчитаны поправочные коэффициенты и определена расчетная средняя длина.

Величины ошибок геометризации вычислены эмпирическим путем по выражению (4.3), а также аналитическим способом на основе оценок средней длины тела по выражению (4.5).

Результаты определения морфологических характеристик и сопоставления ошибок геометризации, рассчитанных разными методами, приведены в таблице 4.5.

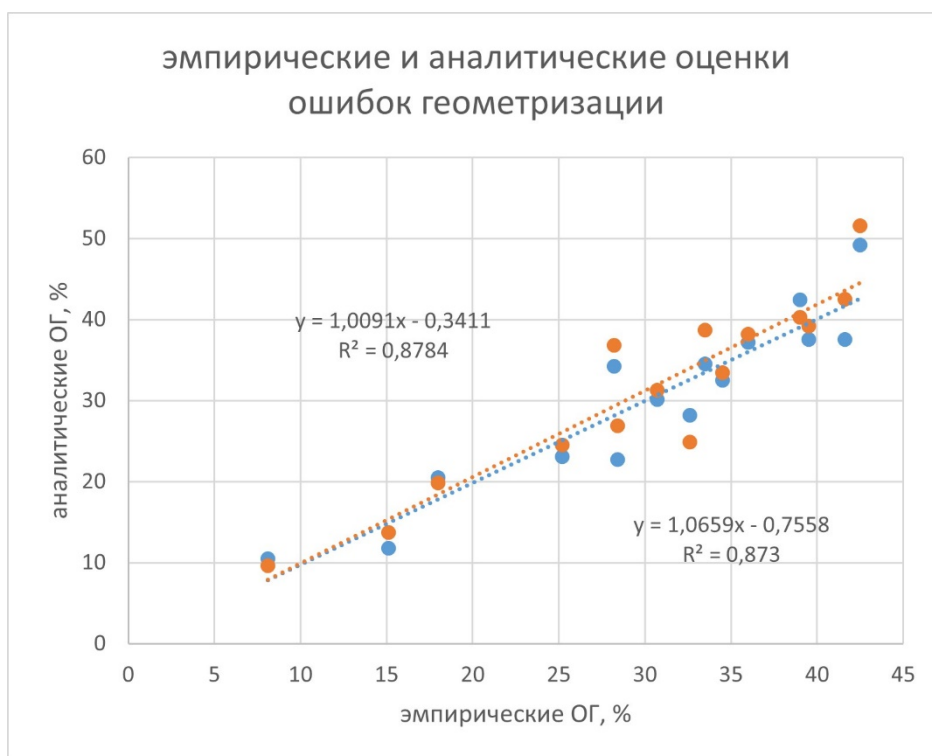
Таблица 4.5 – Морфологические характеристики и ошибки геометризации по объектам

Месторождение	D	S, м <sup>2</sup>	m, м	L <sub>ист</sub> , м	шаг, м	L <sub>разв</sub>	K <sub>попр</sub>	L <sub>р. попр</sub>	Ошибки геометр-ции %		
									эмпир	ан. 1	ан. 2
Албазинское, рз 7	1,431	7930	8,9	36,0	50	83,5	2,45	34,0	28,2	34,2	36,8
Албазинское, рз 5	1,394	14490	13,5	44,5	25	48,0	1,52	31,6	18,0	20,5	19,8
Александровское	1,401	8200	13,6	29,5	50	71,3	2,31	31,0	39,0	42,4	40,3
Многовершинное	1,352	11938	10,6	50	60	135	3,0	44,1	41,6	37,5	42,5
Павлик, р-з 17	1,436	7500	11,0	25,5	40	59,7	2,47	24,2	42,5	49,2	51,6
Павлик гор. 764	1,428	14900	18,2	33,0	50	83,5	2,44	32,3	33,5	34,5	38,7
Наталкинское, г-т	1,225	24028	13,5	67,0	100	175	2,76	63,8	39,5	37,5	39,2
Наталкинское, г-т	1,316	35276	21,5	110	100	366	3,94	92,9	28,4	22,7	26,9
Наталкинское, г-т	1,312	40522	23,6	108	100	399	3,91	102	25,2	23,1	24,5
Джусинское, р-з	1,272	3125	9,5	33,6	50	59,5	1,82	32,7	36,0	37,2	38,2
Березняковское	1,485	5650	11,7	17,7	20	30,7	1,485	20,7	32,6	28,2	24,9
Первенец г 190	1,234	2115	6,6	16,6	20	20,8	1,30	16,0	30,7	30,1	31,3
Первенец г 200	1,252	2375	5,1	15,4	20	21,0	1,40	15,0	34,5	32,5	33,4
Вернинское г 920	1,313	45023	55,1	119	50	238	1,83	130	8,1	10,5	9,6
Вернинское г 870	1,243	42412	48,3	106	50	157	1,73	91,2	15,1	11,8	13,7

В таблице приняты следующие обозначения:  $D$  – мера Хаусдорфа;  $S$  – площадь рудного тела в сечении;  $m$  – средняя мощность рудного тела;  $L_{ист}$ , – истинная средняя длина рудного тела; шаг (сети) в пределах сечения;  $L_{разв}$  – средняя длина рудного тела по разведочному контуру;  $K_{попр}$  – поправочный коэффициент к длине рудного тела;  $L_{р. попр}$  – средняя длина рудного тела с учетом поправки.

Величины ошибок геометризации представлены в трех последних столбцах. В первом из них указана ошибка геометризации, определенная эмпирическим способом при максимально плотной сети; во втором – ошибка, вычисленная по аналитическому выражению (4.3) на основе истинной длины, также установленной при предельно плотной сети (столбец 5). В последнем столбце указана ошибка геометризации, вычисленная по процедуре с использованием теории фракталов, не требующей наличия участков детализации.

Сравнение результатов определений ошибок геометризации эмпирическим и аналитическими методами представлены на рисунке 4.12.



*Рисунок 4.12 – Сравнение эмпирических и аналитических оценок ошибок геометризации синее – корреляционное поле точек аналитической оценки по выражению 13, красное – корреляционное поле точек аналитической оценки с использованием теории фракталов*

Сходимость результатов замеров и расчетов по предлагаемым процедурам является удовлетворительным. Коэффициенты в уравнениях регрессии, характеризующие углы наклона, близки к 1, что говорит об отсутствии существенных систематических ошибок в результатах определений. Использование принципов фрактальной геометрии позволяет прогнозировать значения «истинной» длины и, соответственно, величину ошибок геометризации для сети с разным шагом пересечений.

Возможность использования предложенных процедур определения ошибок геометризации можно продемонстрировать также для жилых и жилородных объектов, где ведущим показателем является их геометризации на проекциях рудных тел.

В качестве примера предлагается рассмотреть результаты оконтуривания одного из жилых золоторудных месторождений, разведка которого проводилась скважинами колонкового бурения по сети 50×50 м, запасы были оценены по категории С<sub>1</sub>. В процессе отработки месторождения выполнялось сопровождающее эксплуатационное опробование по сети 5×(5-10) м. Была установлена относительно сложная форма рудных тел, выделяемых при установленных кондициях. На рисунке 4.13 имитируются результаты оконтуривания рудного тела по сети 50×50 м при одном из вариантов наложения разведочной сети на контуры рудного тела.

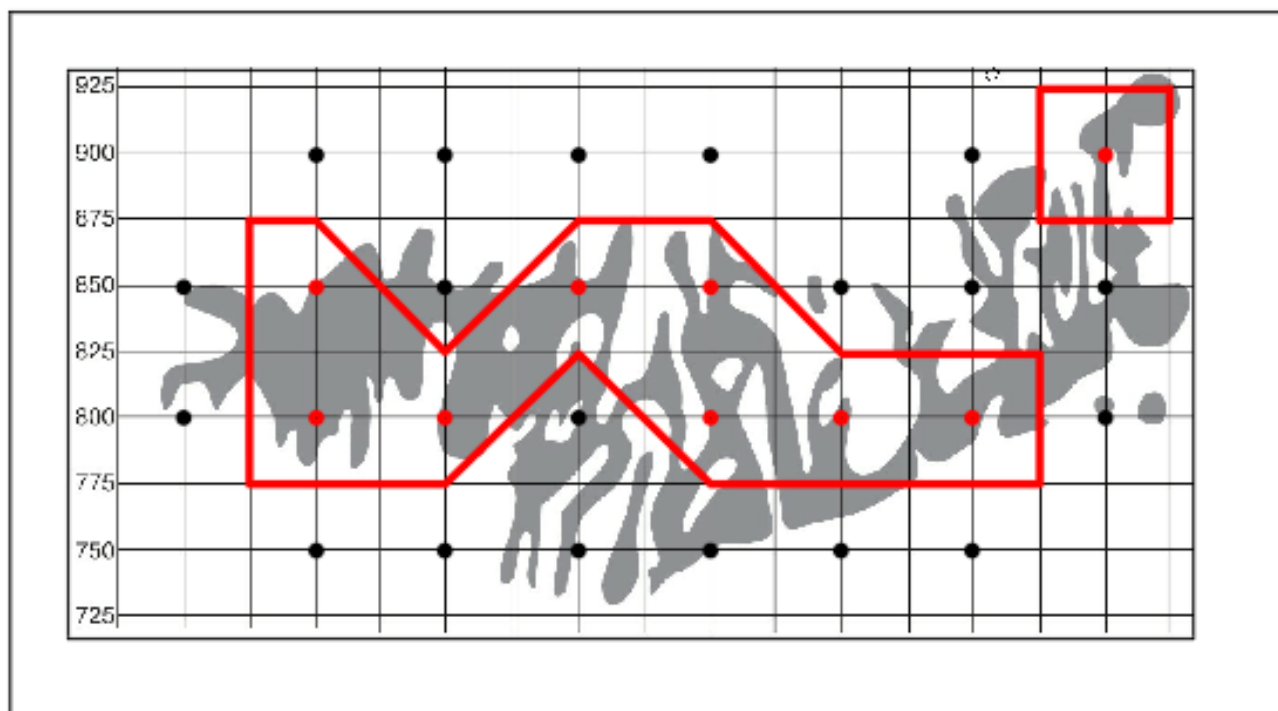


Рисунок 4.13 – Оконтуривание рудного тела на проекции по при разведке по сети 50×50 м

Морфологические характеристики оруденения, включая оценку фрактальной размерности, приведены в таблице 4.6. Кроме того, в ней приведены оценки геометрических показателей «разведочного контура» при разных параметрах сети и результаты определения ошибок геометризации эмпирическим и аналитическими методами.

Таблица 4.6 – Морфология и ошибки геометризации по вариантам сети

Условия определ.	Направ- ление	Площадь м <sup>2</sup>	Размер- ность, d	Длина ист., м	Длина разв. М	K <sub>попр</sub>	Длина с попр.	Ошибки геометризации, %		
								эмпирич	анал. 1	анал. 2
Детальная сеть	прост.	20625	1,41	41	41	1	41	0	0	0
	падение			25	25	1	25			
Сеть 50×50 м	прост.	21500			86	2,36	36,4	57,6	58,6	59,1
	падение				61,4	2,36	26			
Сеть 40×25 м	прост.	20000			72,7	1,96	37,1	37,4	34,9	36,6
	падение				39,0	1,56	25,3			

При использовании для разведки объекта сети 50×50 м ошибка геометризации, оцененная эмпирическим методом, составляет 57,6 %. Эта величина обычно считается высокой применительно к категории С<sub>1</sub>, в связи с чем разведочную сеть можно считать по этому критерию недостаточной.

С целью подбора параметров сети для этой категории был проверен вариант наложения сети 40×25 м. В этом случае эмпирическая оценка ошибки геометризации составит 37,4 %, что сопоставимо с ее величиной для других месторождений, разведанных по категории С<sub>1</sub> (Рисунок 4.14).

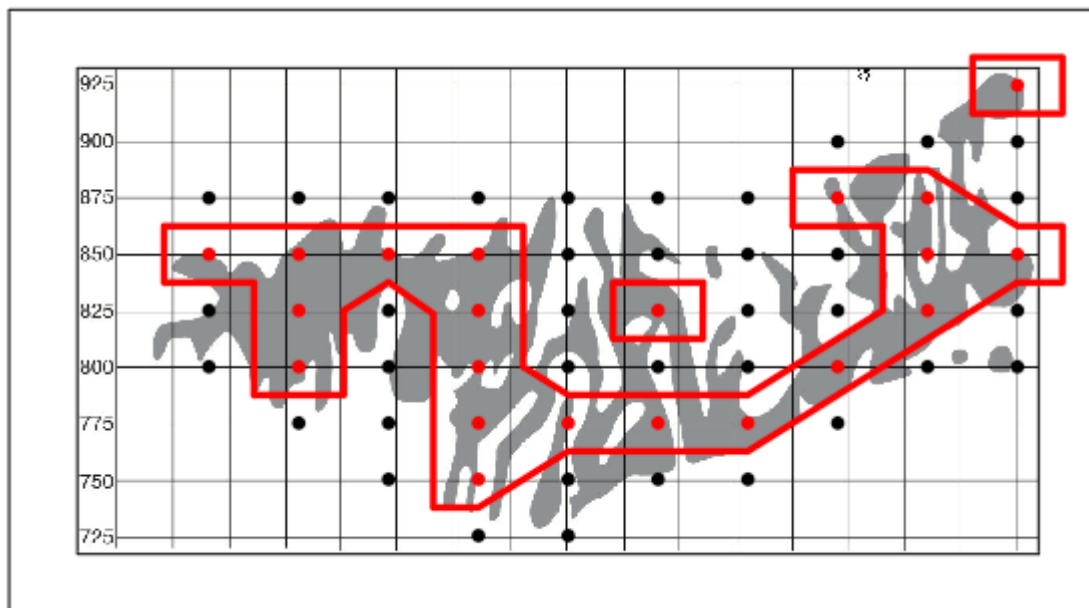


Рисунок 4.14 – Оконтуривание рудного тела на проекции по при разведке по сети  $40 \times 25$  м

Можно отметить, что ошибки геометризации, рассчитанные аналитическими методами, в том числе с использованием фрактальной размерности объекта (последний столбец), достаточно хорошо согласуются с ее эмпирической оценкой.

Другой метод оценки ошибок геометризации на ранних стадиях ГПР, опирающийся на фрактальные характеристики объекта, может быть предложен для случаев, когда графические построения, используемые для определения характеристик разведочного контура, являются исключительно ненадежными вследствие неоднозначной увязки.

Метод базируется на определении средней ширины площадок, которые определяют искажения разведочного контура относительно истинного. Он не требует графических построений, но отличается меньшей корректностью.

Известно, что при оконтуривании по относительно редкой сети форма рудного тела всегда представляется более простой в сравнении с истинной (Рисунок 4.15 и Рисунок 4.16).

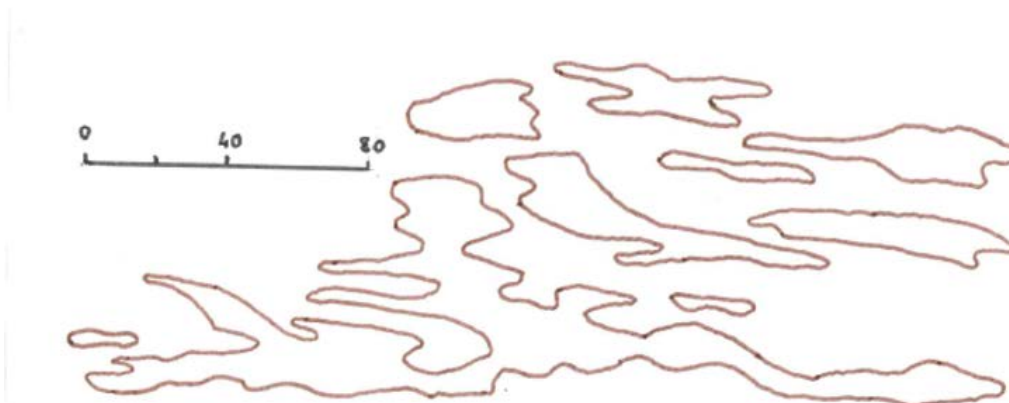


Рисунок 4.15 – «Истинная» форма рудных тел по данным СЭР

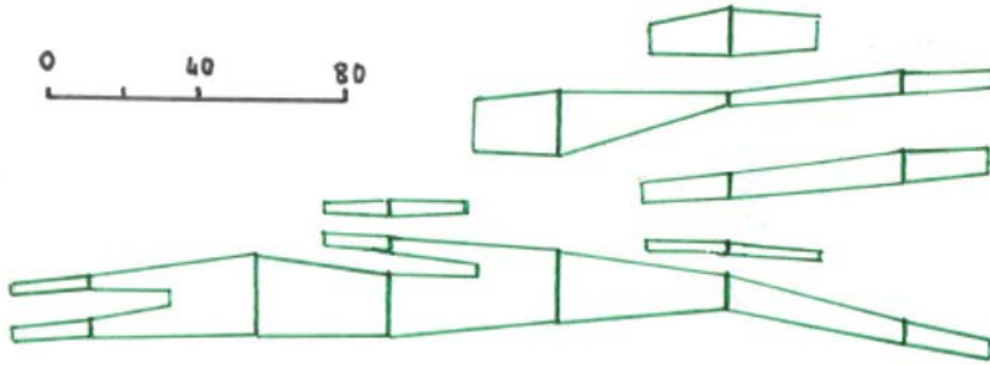


Рисунок 4.16 – Представления о форме рудных тел по данным разведки (шаг сети – 40 м)

В результате длина «разведочного» контура по периметру всегда оказывается меньше, чем длина «истинного» контура. В соответствии с принципами фрактальной геометрии соотношение их периметров может быть выражено через коэффициент удлинения ( $K_{уд}$ ), который учитывает фрактальную размерность объекта:

$$K_{попр} = \sqrt{K_{уд}} = P_{ист}/P_{разв} = (A/a)^{D-1} \quad (4.20)$$

где  $P_{ист}$  – периметр рудного тела при наименьшем шаге  $a$ ;

$P_{разв}$  – периметр рудного тела по данным разведки при шаге сети  $A$ ;

$D$  – размерность Хаусдорфа.

Для определения величины удлинения при разных значениях  $D$  и соотношениях размеров  $A$  можно использовать номограмму, приведенную на рисунке 4.17.

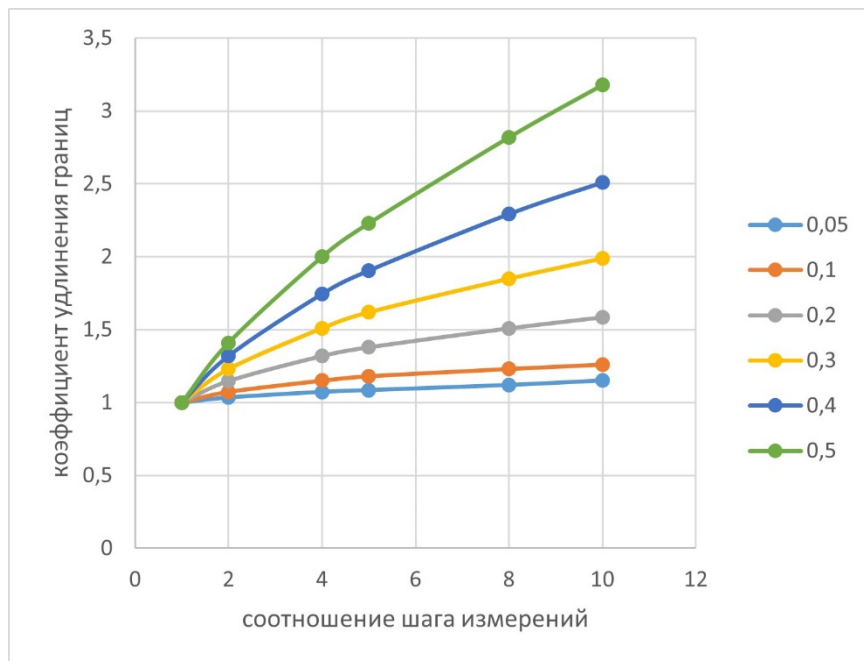


Рисунок 4.17 – Номограмма для определения величины коэффициента удлинения контура в зависимости от соотношения шага исходной сети к конечному размеру шага измерений при разном значении  $D-1$

Средняя ширина искажающей площадки  $H_S$  может быть оценена по выражению:

$$H_S = A/20 * (K_{уд}^2 - 1)^{0.5} \quad (4.21)$$

где  $A$  – шаг разведочной сети, относительно которой определяется величина ошибки геометризации.

Соотношение  $A/20$  установлено на основе исследования соотношений расчетных и фактических экспериментальных ошибок геометризации.

В формуле (4.3) для определения ошибки геометризации эмпирическим методом сумму искажающих площадок ( $\sum S_{рз} + \sum S_{пв}$ ) можно представить, как:  $H_S * P$ , где  $H_S$  – средняя ширина искажающей площадки,  $P$  – периметр рудного тела, определенный по разведочным данным.

Таким образом, ошибка геометризации будет равна:

$$\delta_{(A)} = H_S * P_{разв}/2S_{ист} \quad (4.22)$$

Для удлиненных рудных тел величина  $P/S$  приближенно равна  $2/m$ , где  $m$  – средняя мощность рудного тела. Соответственно, величину ОГ можно вычислить как:

$$\delta_{(A)} = H_S/m * 100 \% \quad (4.23)$$

Возможность использования данного подхода проверена на основе расчетов по ряду объектов (Таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Сравнение фактических и расчетных значений ошибок геометризации по объектам

Месторождение	D	m, м	Шаг, м	ОГ <sub>эмп</sub> , %	K <sub>уд</sub>	(K <sub>уд</sub> <sup>2</sup> - 1) <sup>0,5</sup>	H <sub>S</sub> <sup>расч</sup> , м	ОГ <sub>расч</sub> %
Александровское	1,401	13,6	50	<b>39,0</b>	2,51	2,29	5,72	<b>42,0</b>
Многовершинное	1,352	10,6	50	<b>41,6</b>	2,25	2,01	5,04	<b>47,5</b>
Павлик	1,436	11,0	50	<b>42,5</b>	2,50	2,29	4,48	<b>40,7</b>
Наталка	1,225	13,8	100	<b>39,5</b>	1,62	1,27	6,36	<b>46,1</b>
Вернинское, р-з	1,243	23,4	60	<b>21,2</b>	1,77	1,46	4,38	<b>18,7</b>

Сопоставление показывает, что расчетное определение величины ОГ является вполне достаточным для решения вопроса о выборе параметров сети на ранних стадиях ГРР.

Ширина искажающей площадки при выбранном шаге сети для определенного объекта является относительно стабильной величиной. С ее учетом можно определить область, в пределах которой будет находиться контур рудного тела, а также оценить вероятность обнаружения руды в зависимости от удаления от проведенного разведочного контура. Знание величины этого «коридора» позволяет решать вопрос о принадлежности оруденения к ранее выявленным запасам в их приконтурной полосе или об обнаружении ранее неизвестных рудных тел. Такой вопрос достаточно часто возникает при проведении данных разведки и отработки.

При постоянных значениях размерности и коэффициенте удлинения величина ошибки геометризации, выраженная в относительном виде, будет зависеть от мощности рудного тела, что

позволяет прогнозировать ее величину как для отдельных участков месторождения, так и для разных вариантов кондиций.

Принципы применения фрактальных характеристик, как показано в работе [58], могут быть использованы для оценки величины потерь и разубоживания, которые происходят по контуру рудного тела. Фактор удлинения контура при детализации работ в существующих нормативно – методических документах [69,70] не учитывается, что приводит к неверному определению плановых показателей.

#### 4.4.4 Оценка ошибок геометризации с использованием вариограмм

Выбор параметров разведочной сети с позиций ошибок геометризации можно осуществлять с использованием вариограмм, что широко используется исследователями за рубежом, для которых она рассматривается как показатель выдержанности (continuity) оруденения. Связь характеристик вариограмм с ошибками геометризации фактически не раскрывается.

В действительности вариограмма представляет собой функцию, в которой проявляется взаимозависимость геометрических особенностей объекта с характеристиками его изменчивости. Обычно вариограммы содержания строятся по минерализованным зонам в целом, в связи с чем полученные радиусы корреляции характеризуют размеры элементов неоднородностей, не увязанные с собственно размерами рудных тел. В то же время вариограммы индикаторов, построенные при разных значениях бортовых содержаний, показывают, что радиусы корреляции последовательно уменьшаются при увеличении бортового лимита. Это положение может быть проиллюстрировано на примере месторождения Сан-Рафаэль (Венесуэла) по данным, предоставленным А.А. Котовым. На рисунке 4.18 показана всенаправленная вариограмма, построенная в границах минерализованной зоны А2 по содержаниям.

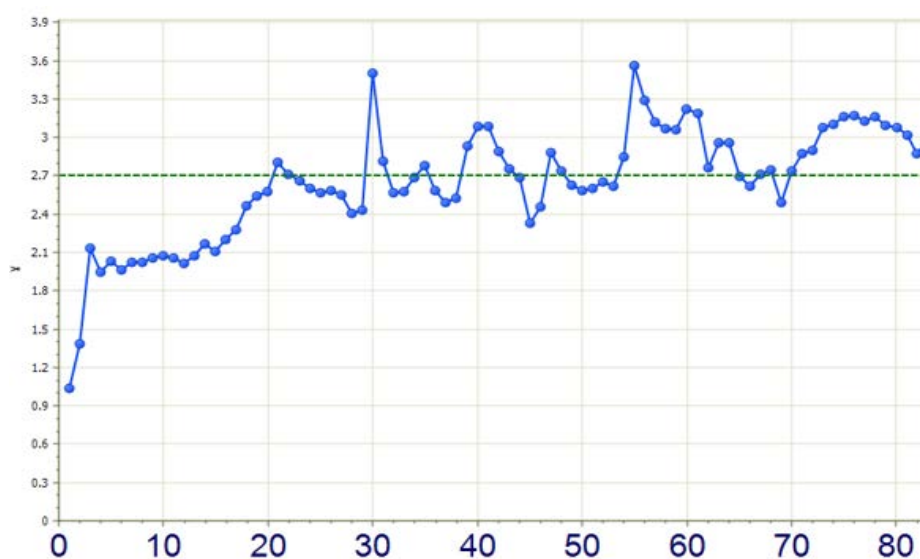


Рисунок 4.18 – Всенаправленная вариограмма содержания, зона А2



Для данной вариограммы можно говорить о выходе на пороговые значения при расстояниях 30 – 40 м.

На рисунке 4.19 представлена вариограмма, построенная по той же зоне для индикатора при бортовом содержании 0.2 г/т. Вариограммы содержаний и индикатора в данном случае близки между собой по величине радиуса корреляции (range).



Рисунок 4.19 – Всенаправленная вариограмма, индикатор, зона А2, борт 0.2 г/т

Всенаправленная вариограмма для индикатора при бортовом содержании 0.6 г/т представлена на рисунке 4.20.

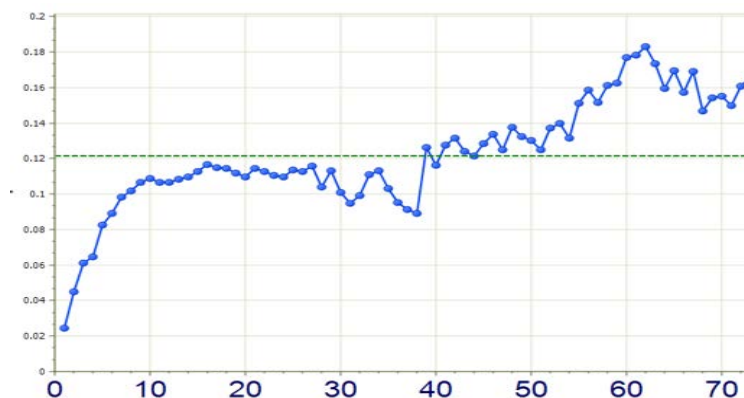


Рисунок 4.20 – Всенаправленная вариограмма, индикатор, зона А2, борт 0.6 г/т

Для данной вариограммы характерно уменьшение радиуса корреляции примерно до 15 м. Увеличение бортового содержания до 1.5 г/т (Рисунок 4.21) приводит к сокращению радиуса до первых метров, при этом резко возрастает величина эффекта самородков.

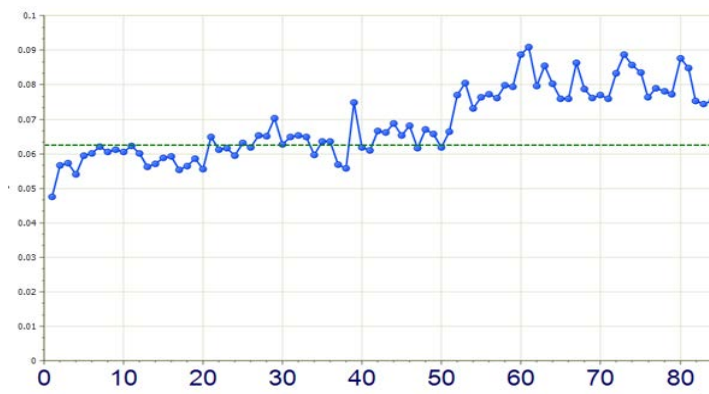


Рисунок 4.21 – Всенаправленная вариограмма индикатора, зона А2, борт 1,5 г/т



Представленные данные показывают, что вариограммы индикатора отражают изменения размеров рудных тел по разным направлениям в зависимости от условий оконтуривания.

В тех случаях, когда вариограммы содержаний строятся в пределах рудных тел, оконтуренных по определенным кондициям, их вид почти полностью совпадает с характеристиками индикаторных вариограмм.

Это положение может быть проиллюстрировано на примере месторождения Павлик, где по данными сопровождающей эксплуатационной разведки, были рассчитаны вариограммы того и другого вида при бортовом содержании 0.8 г/т (Рисунок 4.22).

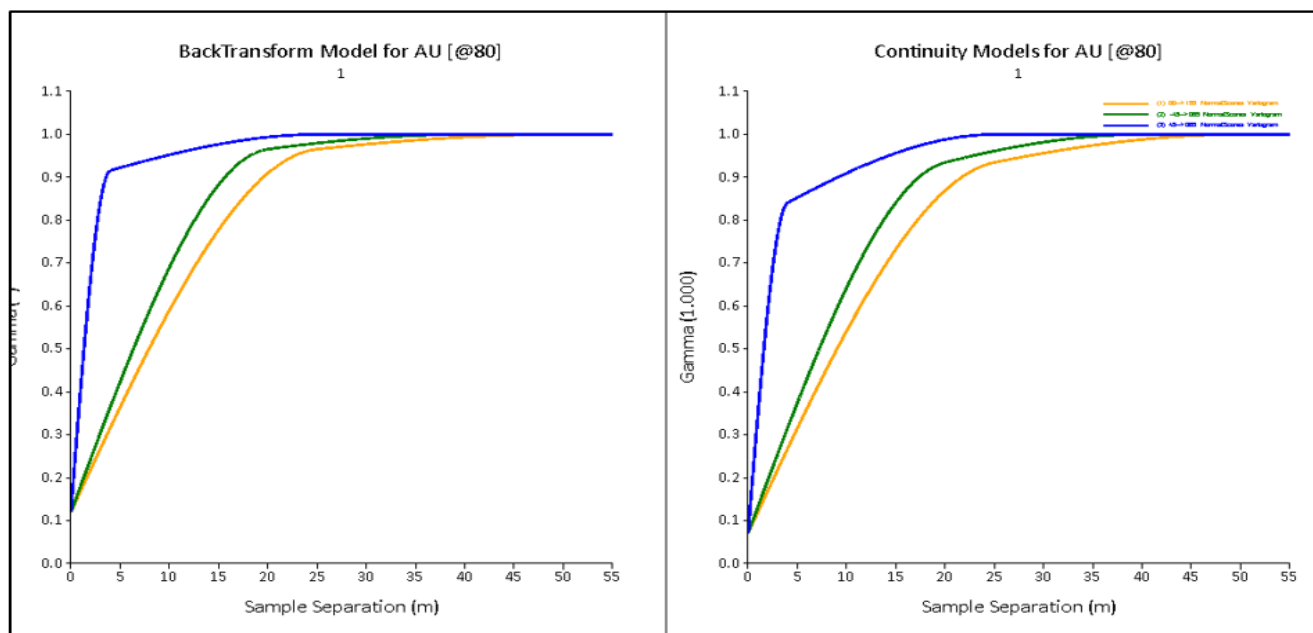


Рисунок 4.22 – Вариограммы содержаний (слева) и индикаторов (справа) по данным эксплуатационной разведки золоторудного месторождения Павлик при бортовом содержании 0.8 г/т

Вариограммы по разным направлениям характеризуются достаточно близкими значениями радиусов.

Использование вариограмм для оценки ошибок геометризации предполагает определение средних размеров рудных тел по падению или простиранию и вычисление ошибок геометризации по аналитическому выражению (4.5). В приведенном примере радиус для направления простирания можно принять равным 30 м. При шаге сети по данному направлению 50 м, принятому для разведки запасов по категории  $C_1$ , величина ошибки геометризации составит:  $\delta(A) = 100 * 50/4 * 30 = 41,7 \%$ . Это значение достаточно хорошо согласуется с эмпирической оценкой ошибки геометризации 42.5 % (Таблица 4.7).

Следует отметить, что определение ОГ с использованием вариограмм обладает большей универсальностью в сравнении с эмпирическими оценками, на которые влияет еще и представительность участка детализации. Вместе с тем данный подход может применяться только в случае, когда имеется достаточная информация для относительно надежного построения

вариограмм. Его роль повышается при квалификации запасов в процессе ведения эксплуатационных работ.

Анализ данных по разведанным месторождениям показывает, что корректировка сети по величине ошибок геометризации требуется в относительно редких случаях; она может осуществляться на отдельных участках, характеризующихся сложностью морфологии оруденения.

*На основе изложенных материалов к защите предлагается Тезисное положение 2:*

*Выбор на количественной основе параметров разведочной сети должен ориентироваться на достижение заданной точности оценки запасов, которая относится к количеству руды, сопоставимому с годовой/квартальной производительностью предприятия. Точность оценки средних содержаний вычисляется через дисперсию случайной составляющей изменчивости, определяемой на основе статистических и геостатистических исследований с учетом числа наблюдений/проб в изучаемом рудном объеме.*

*Надежность оконтуривания запасов количественно характеризуется величиной ошибок геометризации, которые функционально связаны с параметрами разведочной сети и морфологией объекта. Оценку ошибок геометризации на ранних стадиях геологоразведочных работ предлагается проводить с применением аналитических выражений, основанных на результатах геостатистического анализа по индикаторным вариограммам, а также на изучении фрактальной размерности объектов.*

## 5 КРИТЕРИИ РАЗВЕДАННОСТИ И ИХ ДОПУСТИМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ

### КАТЕГОРИЙ ЗАПАСОВ

На основе анализа требований к изученности запасов/ресурсов рудных месторождений, предъявляемых как отечественными нормативными документами, так и требованиями зарубежных стандартов, а также исходя из всего опыта их изучения, следует, что основными критериями разведанности являются:

- погрешности оценки геологоразведочных параметров;
- ошибки геометризации рудных тел.

Необходимость применения таких критериев обсуждается достаточно давно в работах различных авторов [3, 5, 13, 22, 24, 28, 31, 33, 38, 40, 43, 72, 86, 88] и в настоящее время не вызывает сомнений. Вместе с тем предельные их значения для запасов различных категорий однозначно не установлены, хотя они также предлагались в различных публикациях. Не определены они и в нормативно-методических документах ГКЗ. Главными причинами такого положения являются недостаточность обоснования предлагаемых значений и неопределенность объемов недр, к которым они должны применяться.

Основными способами решения данной проблемы можно считать:

- обобщение опыта квалификации запасов по категориям с определением фактических значений данных критериев;
- определение рудных объемов недр, на которые следует распространять требования к критериям для запасов разных категорий;
- учет потребностей горного производства с позиций обеспечения эффективной работы предприятия в течение определенного периода времени.

Решение первой задачи представляется наиболее простой в реализации, с этой целью необходимо провести анализ результатов квалификации запасов/ресурсов на уже изученных месторождениях. При его проведении необходимо установить параметры сети, использованной для оценки запасов той или иной категории, определить характеристики изменчивости свойств изученного объекта, а также его морфологические особенности.

Для решения второй задачи предлагается использовать концепцию, получившую достаточно широкое признание. Она состоит в применении точности оценки к блокам, сопоставимым с годовой, полугодовой или квартальной производительностью предприятия. Данный подход позволяет соотносить требования к изученности месторождения с его масштабом.

Учет требований горного производства заключается, прежде всего, в изучении конкретных ситуаций для данного предприятия, включая экономический анализ его деятельности. В соответствии с этим определяется степень влияния того или иного критерия на показатели эффективности работы предприятия и корректируются их предельные значения.

С целью обоснования допустимых значений критериев разведанности для запасов определенных категорий были проведены исследования по определению их фактических величин на уже разведанных месторождениях, запасы которых прошли апробацию в ГКЗ. В качестве основного параметра подсчета было принято содержание золота, поскольку оно характеризуется наибольшей изменчивостью, а ошибки в его определении в максимальной степени сказываются на работе горнодобывающего предприятия.

Исследования выполнены применительно к запасам категории  $C_1$ , которую можно рассматривать как базовую для объектов разного масштаба. При этом предполагается, что площадь разведочной ячейки для запасов категории В будет уменьшена в 4 раза, а значения критериев снизится в 2 раза. Для категории  $C_2$  величина критериев при соответствующем изменении параметров сети увеличится в 2 раза.

Были изучены фактические погрешности оценки запасов, а также величины ошибок геометризации применительно к имеющейся плотности разведочной сети.

### **5.1 Анализ разведанности месторождений с позиций погрешности оценки параметров подсчета**

В качестве основного параметра подсчета принято содержание золота, поскольку оно характеризуется наибольшей изменчивостью, а ошибки в его определении в максимальной степени сказываются на работе горнодобывающего предприятия. Исходные данные для анализа по ряду золоторудных объектов были получены при проведении подсчета запасов, а также приняты из протоколов ГКЗ РФ. Для отдельных месторождений, включая объекты стран СНГ, необходимые сведения получены из публичных отчетов о запасах, составленных иностранными аудиторами [101-139].

Расчеты по определению фактических погрешностей оценки содержаний проводились на основе описанного ранее алгоритма, в котором используются формулы математической статистики. Возможности их применения для оценки погрешности в определении средних содержаний предварительно были изучены с позиций влияния закономерностей в пространственном изменении признака на характеристики изменчивости, в том числе на дисперсию признака.

Для оценки влияния этого фактора для уже разведанных месторождений проведены исследования по определению соотношения характеристик вариограмм с шагом сети, принятым

для разведки ресурсов категории indicated или запасов категории C<sub>1</sub>. В основу сравнения приняты данные, имеющиеся в публичных отчетах отечественных и зарубежных компаний.

Сопоставление пороговых расстояний вариограмм с шагом разведочной сети приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сравнение пороговых расстояний вариограмм с шагом разведочной сети

Месторождение	Год	Страна	Простирание, м		Падение, м	
			Вариограмма	Шаг	Вариограмма	Шаг
Тигр	2016	Канада	60	30	25	25
Бивер Дэм	2015	Канада	50	25	20	25
Вава	2016	Канада	15	25	12	25
Холлистер	2017	США	50	25	25	20
Сонгджягу	2016	КНР	80	60	40	60
Валентин Лейк	2018	Канада	40	25	40	25
Кларенс Стрим	2017	Канада	40	25	40	25
Роса Гранде	2016	Бразилия	25	50	15	30
Пилар	2015	Венесуэла	40	70	10	48
Пайн Гроув	2015	США	30	50	30	50
Бомборе	2017	Буркина Фасо	70	50	40	25
Карибу	2017	Канада	45	30	30	20
Асанко	2017	Гана	25	30	20	30
Павлик	2018	Россия	30	60	25	50
Наталка	2012	Россия	120	200	60	50

Приведенные данные показывают, что шаг сети и пределы корреляции (пороговые значения), в среднем близки между собой. В ряде случаев для зарубежных месторождений отмечается существенное (до 2 раз) превышение пределов корреляции относительно шага сети. Вместе в тем анализ конкретных ситуаций показывает, что такое превышение не приводит к пропорциональному уменьшению доли случайной составляющей дисперсии, поскольку вариограммы имеют, как правило, «выпуклый» характер, соответствующий сферической или двухструктурной аппроксимирующей функции. Пример такой функции для рудного тела месторождения Нежданинское приведен на рисунке 5.1.

Вариограмма не имеет отчетливо выраженного перегиба в области выхода на пороговые значения. Условно можно принять, что предел корреляции здесь равен 50 - 55 м. При сгущении сети до 20 - 25 м доля случайной компоненты дисперсии сокращается на первые проценты, что практически не повлияет на погрешности оценки содержания.

Кроме того, следует иметь в виду, что в зарубежных отчетах приводятся вариограммы, построенные в целом для минерализованных зон; при выделении оруденения по принятому бортовому содержанию или уровню cut-off пороговые значения вариограмм должны сокращаться. Таким образом, влиянием закономерной составляющей изменчивости на

определение погрешности оценки средних содержаний для запасов категории  $C_1$  можно пренебречь.

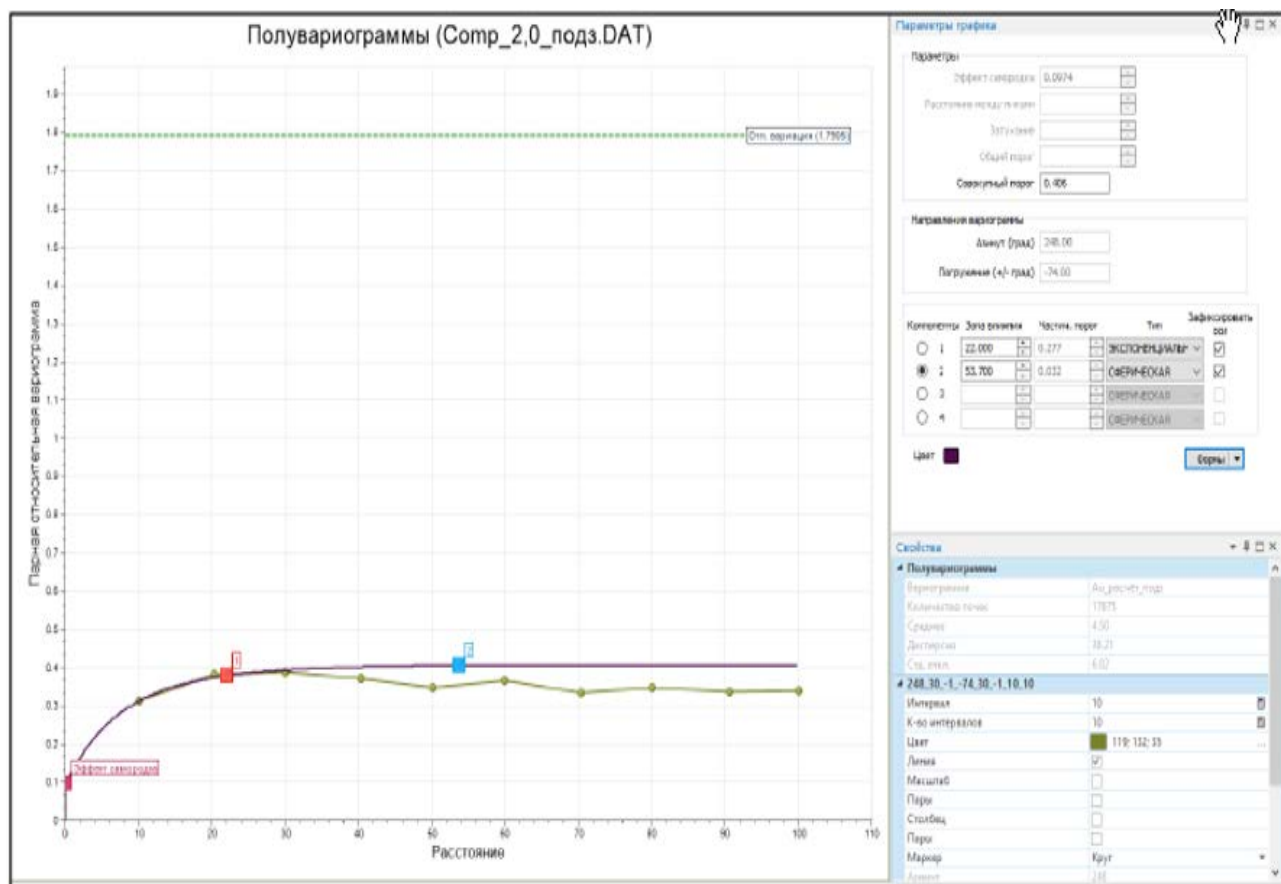


Рисунок 5.1 – Вариограмма при бортовом содержании золота 2.0 г/т по падению для рудного тела 1 Нежданнинского месторождения

Основными положениями расчета фактических погрешностей являются:

- оценка погрешности осуществляется применительно к рудному объему, сопоставимому с годовой производительностью ( $A$ ) горнодобывающего предприятия;
- изменчивость и коэффициент вариации ( $V_C$ ) содержаний определяется по пробам или композитам, влияние «закономерной» составляющей не учитывается;
- длина проб или композитов ( $L_{пр}$ ) определена относительно истинной мощности рудного тела;
- погрешность определения содержаний ( $\Delta_{факт}$ ) оценивается как относительное стандартное отклонение при доверительной вероятности 0.68, величина критерия Стьюдента принимается равной 1;
- учитываются фактические параметры сети, принятой для оценки запасов категории  $C_1$ , и площадь разведочной ячейки ( $S_{яч}$ ).

При проведении расчетов вычисляются:

- объем блока годовой производительности с учетом объемной массы руд;

- общая площадь как отношение объема к длине пробы;
- количество проб в блоке как отношение общей площади к площади ячейки;
- фактическая погрешность оценки по выражению 4.

Трудности использования данных по отечественным объектам связаны с отсутствием в материалах отчетов статистических расчетов, характеризующих изменчивость содержаний полезного компонента по пробам. Фактические погрешности оценки содержаний ( $\Delta_{\text{факт}}$ ) исследованы по месторождениям, которые характеризуются разным масштабом и степенью изменчивости содержаний золота по пробам.

Изучаемые месторождения условно разделены по производительности (масштабу) на группы: более 5 млн т/год, от 1 до 5 млн т/год и менее 1 млн т/год. По сложности строения объекты относятся к разным группам классификации ГКЗ, что отмечено в последнем столбце приведенных ниже таблиц. Учтено также, что производительность зависит от количества запасов для разных способов отработки, такие объекты отмечены индексами ОГР и ПГР.

Результаты расчетов приведены в таблицах 5.2 - 5.4.

Таблица 5.2 – Фактическая погрешность оценки содержаний для запасов категории  $C_1$  по крупным месторождениям (производительность более 5 млн тонн)

Месторождение	A, млн т	Объем, м <sup>3</sup>	L <sub>пр</sub> , м	Общая пл. м <sup>2</sup>	V <sub>c</sub>	Сеть, м	S <sub>яч</sub> , м <sup>2</sup>	Кол- во проб	$\Delta_{\text{факт}}$ , %	Групп- па
Наталка	25	9250000	2.5	3700000	2,5	50x200	10000	370	13,0	2
Сухой Лог	25	9250000	3	3083333	2,2	50x100	5000	616	8,9	2
Светлинское	8	2962963	1.07	2769124	3.47	50x50	2500	1107.6	10.4	3
Пионер	6,5	2407407	1	2407407	2,72	50x60	3000	802,5	9,5	3
Ункурташ	6,0	2222222	0,8	2777778	3,42	75x50	3750	740,7	12,6	3
Кумтор	5.9	2070175	0.9	2300194.9	2.64	30x40	1200	1916.8	6,0	2
Куранах	5	2130000	4	532000	1,6	60x20	1200	433	7,7	3

Погрешности оценки для крупных по масштабу месторождений изменяются в пределах 6,0 % - 13 % и составляют, в среднем, 9,7 %.

Таблица 5.3 – Фактическая погрешность оценки содержаний для запасов категории  $C_1$  по средним месторождениям (производительность 1 - 5 млн т)

Месторождение	A, млн.т	Объем, м <sup>3</sup>	L <sub>пр</sub> , м	Общая пл м <sup>2</sup>	V <sub>c</sub>	Сеть, м	S <sub>яч</sub> , м <sup>2</sup>	Кол- во проб	$\Delta_{\text{факт}}$ , %	Групп- па
Воронцовское	4,2	1615385	0,95	1700405	3,38	60x50	3000	566,8	14,2	3
Верниское	4	1540000	0,9	1711111	2,62	50x50	2500	684,4	10,0	3
Албын	3,6	1333333	1	1333333	2,89	50x50	2500	533,3	12,6	3
Павлик	3	1111111	1,5	740740	2,1	50x60	3000	247	13,4	3
Майское	3	1111111	0,8	1388889	1,45	80x40	3200	434	7,0	3

Продолжение таблицы 5.3

Месторождение	A, млн.т	Объем, м <sup>3</sup>	L <sub>пр</sub> , м	Общая пл м <sup>2</sup>	V <sub>c</sub>	Сеть, м	S <sub>яч</sub> , м <sup>2</sup>	Кол- во проб	Δ <sub>факт</sub> , %	Групп- па
Маломыр	2,9	1074074	1	1074074	2,81	40x40	1600	671,3	10,8	3
Ключевское	2,9	1062271	0,9	1180301	2,42	50x50	2500	472,1	11,1	3
Коммунар ОГР	2.9	1106870	1	1106870	3.92	10x15	150	7379.1	4.6	3
Покровское	2,6	962963	1	962963	2,5	50x50	2500	385,2	12,7	3
Таборное	2.5	925926	1	925926	1.71	60x60	3600	257.2	10.7	3
Нежданинское	3,0	1153846	1,0	1153846	2,35	40x100	4000	288,5	13,8	2
Токинское	1.73	640741	0.97	660557	1.63	40x50	2000	330.2	9,0	3
Белая Гора	1.7	629630	5	125926	2.05	40x40	1600	78.7	23.1	3
Кочковское	1.5	555556	0.7	793650	1.14	50x50	2500	317.5	6.4	3
Дельмачик	1.4	518519	1	518519	1.67	40x50	2000	259.2	10.4	3
Наседкино	1	370370	0.96	385802	1.36	25x5.	1250	308.6	7.7	3
Вост. Двойной	1,0	381680	1,2	318066	1,09	50x50	2500	127,2	9,7	3

Фактические погрешности оценки содержаний для средних месторождений находятся в пределах 4,6 % - 23,1 %, в среднем они составляют 10,8 %.

Таблица 5.4 – Фактическая погрешность оценки содержаний для запасов категории C<sub>1</sub> по мелким месторождениям (производительность менее 1 млн т)

месторождение	A, млн.т	объем, м <sup>3</sup>	L <sub>пр</sub> , м	общая пл м <sup>2</sup>	V <sub>c</sub>	сеть, м	S <sub>яч</sub> , м <sup>2</sup>	кол- во проб	Δ <sub>факт</sub> , %	групп- па
Березитовое О	0,85	304348	0,9	338164	2,36	40x30	1200	281,8	14,1	3
Олень МНР П	0.814	301481	1	301481	4.65	10x10	100	3015	8.5	4
Бамское	0,8	296300	1	296300	1,5	40x100	4000	74,1	17,4	3
Первенец	0,75	265000	1	265000	1,8	40x60	2400	110,4	17,1	3
Многовершинное	0,7	268000	2,75	97454	2,1	40x50	2000	48,7	30,0	3
Сергеевское	0,7	259259	0,7	370370	1,65	40x50	2000	185,2	12,1	3
Малый Тарын	0,6	230760	0,54	427350	1,8	40x40	1600	267	11,0	4
Родниковое	0.6	222222	1	222222	0.97	10x60	600	370.4	5,0	3
Озерновское	0,4	156863	0,8	196078	2,2	50x25	1250	156,9	17,6	3
Березитовое П	0,2	71430	0,9	79365	1,69	40x30	1200	66,1	20,8	4
Пинигинское	0,2	71430	0,9	79365	1,82	40x40	1600	44,6	27,2	4
Дарасун	0.2	74074	0.8	92593	7.1	3x50	150	617.3	28.6	4
Бараньевское	0.14	51852	1	51852	1.58	40x40	1600	32.4	27.8	4
Кунгурцевское	0.14	51852	1	51852	1.2	40x40	1600	32.4	21.1	4
Южно-Агинское	0.14	51852	1	51852	1.43	20x40	800	64.8	17.8	4
Приморское	0.135	50943	0,7	72776	3.54	25x25	625	116.4	32.8	4
Левобережное	0.135	50000	0.95	52632	2.18	20x20	400	131.6	19,0	4
Надежда, Т.Ю.	0,13	49618	0,9	55131	1,92	10x10	100	551,3	8,2	4
Венера	0,05	18852	0,5	37693	2,22	10x10	100	376,9	11,4	4

Для мелких по масштабу месторождений фактические погрешности изменяются в пределах от 5,0 % до 32,8 %, в среднем она составляет 18,3 %.



Зависимость фактических погрешностей оценки средних содержаний для запасов категории  $C_1$  от масштаба уже разведанных объектов иллюстрируется рисунком 5.2.

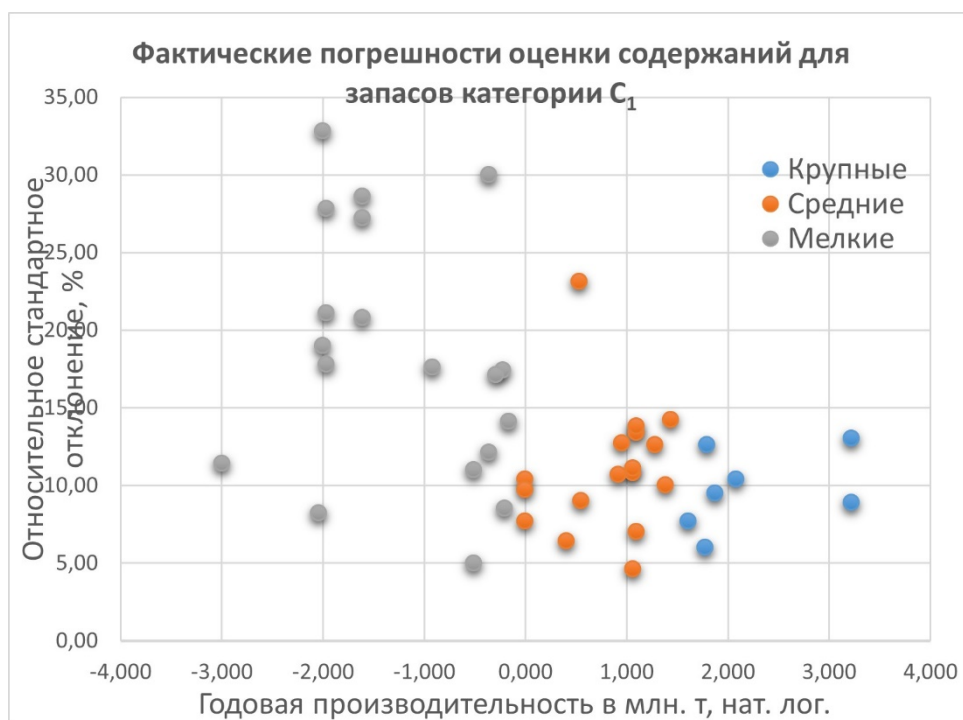


Рисунок 5.2 – Фактические погрешности оценки содержаний и масштаб объектов для запасов категории  $C_1$

Таким образом, обнаруживается тенденция увеличения фактических погрешностей оценки содержаний от крупных и уникальных месторождений к мелким. Можно отметить, что относительно небольшие месторождения характеризуются, как правило, повышенным качеством руд, в связи с чем высокие погрешности оценки средних содержаний для них не являются критичными.

В целом по результатам оценки фактической разведанности в качестве предельного допустимого значения погрешности среднего содержания для запасов категории  $C_1$  применительно к крупным и средним месторождениям можно принять величины 10 % - 12 %. Для мелких месторождений с высоким содержанием полезного компонента предельное значение погрешности может быть увеличено до 20 %. Наличие месторождений, для которых уровень погрешности оценки превышает указанные пределы, говорит о необходимости корректировки для них параметров разведочной сети.

В настоящее время в литературе [1, 27, 79, 89], а также на семинарах и форумах обсуждается проблема гармонизации отечественных подходов к оценке месторождений и подходов, соответствующих шаблону КРИРСКО. В связи с этим представляется необходимым провести сопоставление разведанности запасов категории  $C_1$  с изученностью ресурсов, относимых к категории indicated. Данное сравнение при необходимости позволит внести корректировку в требования к изученности запасов категории  $C_1$ .

Исходные данные для сопоставления приняты из публичной отчетности о ресурсах (2005 – 2019 гг), выполненной в стандартах NI 43-101 и JORC по золоторудным объектам. Анализ проведен на описанных выше принципах. В случае отсутствия сведений о принятой производительности предприятия ее величина оценивалась в соответствии с формулой Тейлора. Результаты расчетов приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Фактическая погрешность оценки содержаний золота для ресурсов категории indicated

Месторождения	A, млн т	Объем м <sup>3</sup>	L <sub>пр</sub>	Общ. пл.	V, %	Сеть, м	Пл.яч.	N	Δ, %	Тип
Сьембра	31	12643438	3	4214146	2,32	50x100	5000	843	7,9	м зона
Минера	15,4	7014079	3	2338026	1,06	50x50	2500	935	3,3	м зона
Брисас	6,2	2511197	1	2511197	3,48	25x40	1000	2511	7,0	м зона
Асанко	3,27	1168326	1,3	898712	2,83	25x50	1250	719	10,6	жилы
Чоко	2,8	1120000	1	1120000	2,51	25x50	1250	896	8,4	м. она
Бомборе	2,8	1037037	1	1037037	2,9	60x80	4800	216	19,7	залежь
Сонгджягу	2,76	1150810	1	1150810	3,0	50x50	2500	460	14,4	залежь
Валле Хонда	2,3	980005	1	980005	2,56	30x50	1500	653	10,0	м.зона
Розабель	2,1	819751	1	819751	2,92	25x25	625	1312	8,1	залежь
Васса	1,54	595698	1	595698	2,53	25x25	625	953	8,2	залежь
Голден Стар	1,25	456976	1	456970	2,63	25x25	625	731	9,7	залежь
Бивер Дам	1,11	420255	1,7	24208	2,65	30x40	1200	206	18,4	м зона
Инкрейбл	0,84	305454	1	305454	2,53	40x40	1600	191	19,7	залежь
Кларенс Стрим	0,8	327869	0,8	409836	2,41	25x30	750	546	10,3	м зона
Тигр	0,53	196296	1	196296	2,05	30x50	1500	131	17,9	м зона
Голдборо	0,52	178082	0,6	296804	2,65	45x45	2025	147	21,9	жилы
Ео Клэр ПГР	0,48	165517	1	165517	2,32	48x70	3360	49	33	жилы
Пилар	0,35	128205	1	128205	2,65	30x50	1500	86	28,7	жилы
Роса Гранде	0,26	101562	1,2	84635	2,13	30x50	1500	56	28,4	м зона
Пайн Гроув	0,105	42169	1	42169	2,56	20x25	500	84	27,9	жилы
Холлистер	0,73	271011	1	271011	1,02	40x50	2000	135,5	8,6	м зона
Беатон Крик	0,12	54545	0,3	181818	0,91	15x30	450	404	14,5	пласт
Палангана										

Фактические погрешности оценки содержаний изменяются от 3,3 % до 27,9 %. Достаточно отчетливо проявлена тенденция повышения погрешности при уменьшении величины ресурсов и, соответственно, производительности предприятия. Ее среднее значение составляет 12,4 %, что близко к среднему значению этого показателя для запасов категории C<sub>1</sub>. Можно так же отметить, что коэффициент вариации содержаний в пробах для подавляющей части золоторудных объектов, указанных в таблицах 5.2 - 5.4 и 5.5, также сходны между собой.

В графическом виде взаимосвязь фактических погрешностей оценки средних содержаний и масштаба объектов для минеральных ресурсов категории indicated иллюстрируется рисунком 5.3.

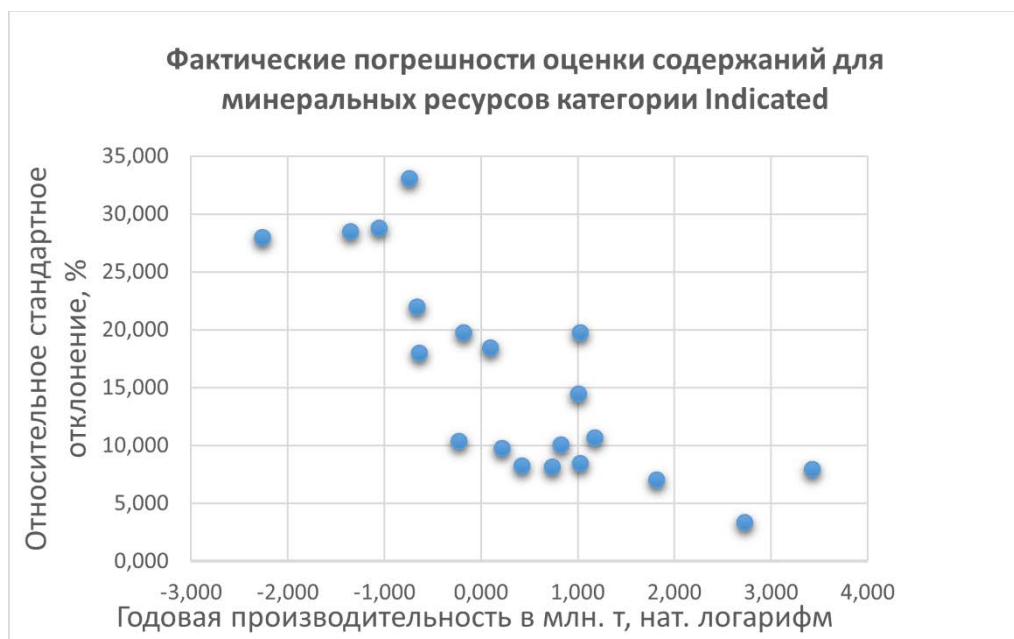


Рисунок 5.3 – Фактические погрешности оценки средних содержаний и масштаб объектов для минеральных ресурсов категории indicated

Дополнительно для сопоставления погрешности в оценке содержаний золота проведены расчеты по описанному алгоритму для изученных месторождений урана. Исходные данные также получены из публичной отчетности о ресурсах (2005 – 2019 гг.). Результаты вычислений представлены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Фактическая погрешность оценки содержаний урана для ресурсов категории indicated

Место-рождение	А, млн т	Объем, м <sup>3</sup>	Длина проб, м	Суммарн. площ., м <sup>2</sup>	Кэф. вар-	Сеть факт.	Пл. яч. факт	Кол-во	$\Delta_{\text{факт.}}$ , %	Морф. тип
Мадауэла	1,56	679396	0,4	1698490	0,65	50x50	2500	679,4	<b>2,3</b>	страт.
Фалеа	1,21	458113	1	458113	2,1	50x50	2500	183,2	<b>15,5</b>	жила
Амарильо	1,67	667385	1	667385	2,96	50x50	2500	267	<b>18,4</b>	страт.
Андерсон	1,97	896539	0,5	1793079	1,51	60x60	3600	498,1	<b>6,7</b>	страт.
Эрроу	0,55	202593	1	202593	2,33	25x25	625	324,1	<b>12,9</b>	м. зона
Бурке Холлоу	0,34	154258	1	154258	1,20	30x60	1800	85,7	<b>13,0</b>	страт.
Себолета	0,56	242174	0,6	403623	1,31	50x50	2500	161,4	<b>10,3</b>	страт.
Сентенинтал	0,75	312083	0,9	346759	1,55	50x50	2500	138,7	<b>13,2</b>	страт.
Солес Хилл	5,56	2176226	0,9	2414063	1,60	60x60	3600	670,6	<b>6,2</b>	м. зона
Даса	1,34	569613	0,5	1139226	2,08	50x50	2500	455,7	<b>9,8</b>	страт.
Кастелло	3,38	1276226	1	1276226	1,50	50x50	2500	510,5	<b>6,6</b>	страт.
Жуан Тафойя	0,45	182682	0,3	608941	1,65	50x50	2500	243,6	<b>10,6</b>	страт.
Мутанга	4,7	2250000	1	2250000	1,36	50x50	2500	900	<b>1,4</b>	страт.
Данерос	1,8	687495	0,9	763884	1,46	25x50	1250	611,1	<b>5,9</b>	страт.

Представленные месторождения урана относятся преимущественно к «инфильтрационному» стратиформному типу, для которого характерна низкая изменчивость содержаний. Высокой изменчивостью отличаются жильные месторождения, они обладают также относительно высокими средними содержаниями.

Расчитанные погрешности оценки содержаний изменяются от 1.4 % до 18.4 %, что сопоставимо с показателями для месторождений золота (Таблица 5.5).

Приведенные сопоставления предварительно позволяют заключить:

- погрешности оценки содержаний для запасов категорий  $C_1$  и ресурсов категории indicated в целом не различаются;
- погрешности оценки ресурсов золота и урана сопоставимы между собой, что позволяет говорить об универсальности данного критерия для рудных месторождений.

Установленные в результате проведенных исследований уровни фактических относительных погрешностей оценки средних содержаний предлагается считать допустимыми/предельными для запасов категории  $C_1$ . Оценка дается в форме стандартных отклонений и применяется к рудным объемам недр, сопоставимым с годовой производительностью. При выборе предельных значений учитывается также масштаб месторождения.

Для запасов категории В такие же по величине пределы применяются к объемам недр, сопоставимым с квартальной производительностью предприятия. В случае, если рассматриваются объемы недр, сопоставимые с годовой производительностью, предельные значения уменьшаются вдвое.

Для запасов категории  $C_2$  предельные значения погрешности должны также устанавливаться применительно к объемам недр, сопоставимым с годовой производительностью; уровень допустимых погрешностей, в сравнении с запасами категории  $C_1$ , увеличивается в два раза.

В сводном виде рекомендации по уровням допустимых погрешностей оценки средних содержаний для разных категорий приведены в таблице 5.7.

Рекомендованные значения допустимых погрешностей могут в некоторой мере корректироваться с учетом задач и условий освоения конкретного объекта.

Таблица 5.7 – Допустимые погрешности оценки средних содержаний (%) для категорий запасов

Категории запасов	Объемы недр, сопоставимые с производительностью	Масштаб месторождений		
		уникальные и крупные	средние	мелкие и очень мелкие
В	квартальной	10	12,5	15
	годовой	5	6,2	7,5
$C_1$	годовой	10	12,5	15
$C_2$	годовой	20	25	30

Для иллюстрации этих утверждений представлены примеры расчета параметров сети (Таблица 5.8) на объектах, недавно представлявшихся в ГКЗ в форме отчетов или документов на проведение ЭТС или консалтинга. Количественное обоснование параметров разведочной сети для них отсутствовало, их выбор осуществлялся на основе группировки по сложности строения с поправками, учитывающими опыт исполнителей.

В представленных расчетах допустимое относительное стандартное отклонение  $S_d$  принималось разным (10 % - 15 %) с учетом масштаба объекта.

Таблица 5.8 – Примеры расчета параметров сети для категории С1 по ряду месторождений

Объект	$S_d$ , %	A, млн/т	ОМ	Объем, м <sup>3</sup>	L, м	$S_{об}$ , м <sup>2</sup>	V, %	N, шт	$S_{яч}$ , м <sup>2</sup>	a x b, м
Каральвеем ЖТ	15	0,400	2,7	148148	0,5	296296	367	599	495	25 x 20
Карал-ем ПЖрт	15	0,400	2,7	148148	0,7	211640	407	735	289	20 x 15
Наталка	10	10,0	2,62	3816794	2,6	1468000	372	1414	10411	200x50
Золотая речка	12	1,0	2,65	377358	2,0	188679	120	100	1887	60 x 30
Кундуми	15	0,15	2,7	55556	0,7	79366	152	102	778	40 x 20
Дражное	15	0,7	2,72	257353	0,8	321691	385	660	489	25 x 20
Угахан	12	2,2	2,7	814815	0,9	905345	187	243	3726	75 x 50
Западное	12	1,6	2,7	592592	0,9	658436	185	237	2778	50 x 50
Гора Рудная	15	0,78	2,7	288889	0,77	375180	192	164	2316	60 x 40
Куросан, Пром.	15	0,53	2,82	187940	0,7	268490	220	144	1865	60 x 30
Куросан, Вост.	15	0,48	2,82	170213	0,7	243161	211	129	1885	60 x 30

Обозначения:  $S_d$ , % допустимое относительное отклонение, A, млн/т – годовая производительность, ОМ – объемная масса, L, м- длина пробы на истинную мощность,  $S_{об}$ , м<sup>2</sup> – общая площадь, V, % - коэффициент вариации содержаний по пробам, N, шт – число проб на объем годовой производительности,  $S_{яч}$ , м<sup>2</sup> – расчётная площадь разведочной ячейки, a x b, м – стороны ячейки, рассчитанные с учетом коэффициента анизотропии.

Месторождение Каральвеем, находящееся в Чукотском АО, отрабатывается подземным способом с 1995 года как жильный объект (ЖТ) золотокварцевой формации. К настоящему времени на нем проведена доразведка, выявившая новый морфологический тип оруденения - прожилково-жильные рудные тела (ПЖрт), характеризующиеся повышенной мощностью, но малыми размерами по простиранию и ширине. Проведенные расчеты показали, что точность оценки содержаний  $\pm 15\%$  в блоках, сопоставимых с годовой производительностью рудника, может обеспечиваться сетью 25×20 м для жильных тел и 20×15 м для прожилково-жильных рудных тел. Эти результаты подтверждают возможность отнесения остаточных запасов месторождения к 4-ой группе сложности по классификации ГКЗ и применения достаточной плотных сетей для их изучения.

Месторождение Наталка отрабатывается открытым способом с 2014 года. При утверждении его запасов рядом специалистов оспаривалась возможность использования сети бурения 200×50 м для получения категории С1. В настоящее время его отработка ведется при более низкой производительности рудника, чем это было предусмотрено в ТЭО-2013. Проверка представленными расчетами показывает, что созданная сеть в данных условиях позволяет

оценивать запасы с погрешностью  $\pm 10\%$ , что, в принципе, соответствует требованиям к категории  $C_1$ .

На проявлении Золотая Речка (Тенькинский район Магаданской области) были проведены поисково-оценочные работы, по результатам которых зоны минерализации, изученные бурением по сети  $100 \times 50$  м, были отнесены к прогнозным ресурсам категории  $P_1$ . Расчеты показывают, что запасы категории  $C_1$  (при погрешности  $\pm 12\%$ ) могут быть получены при плотности сети  $60 \times 30$  м. В этих условиях сеть для категории  $C_2$  может быть принята равной  $120 \times 60$  м, что вполне соответствует уже имеющейся.

Запасы других месторождений, отмеченных в таблице 5.8, утверждались в разное время; параметры сети к категории  $C_1$  устанавливались, как правило, по аналогии. На большей части этих объектов параметры расчетной и фактической сети оказались достаточно близкими. Вместе с тем на месторождении Дрожное расчетная площадь ячейки сети оказалась почти в 2 раза меньшей, чем фактическая. Это расхождение объясняется довольно высоким коэффициентом вариации содержаний в сравнении с другими объектами.

На основе предложенного подхода можно проводить также сравнение требований к количественной оценке запасов в разных классификациях и определять пути их гармонизации.

## **5.2 Анализ разведанности месторождений на основе ошибок геометризации**

Ошибки геометризации с использованием как эмпирических, так и аналитических подходов изучены на ограниченном числе объектов. Трудности анализа этого показателя на изученных месторождениях связаны с тем, что для большинства из них он не является определяющим; необходимость оценки ошибок геометризации определена только в Методических Рекомендациях по сопоставлению данных разведки и отработки (МР). В большинстве отчетов процедура оценки этого показателя выполняется некорректно.

Эмпирическая оценка ошибок геометризации для обрабатываемых месторождений возможна на основе изучения морфологии рудных тел по данным эксплуатационной разведки. Для разведываемых месторождений с этой целью используются данные по участкам детализации, которые имеются далеко не всегда. Это обстоятельство осложняет определение морфологических особенностей объектов, которые позволили бы выполнить расчеты ошибок геометризации аналитическим методом.

Фактические величины ошибок геометризации для запасов категории  $C_1$  изучались ранее на ряде месторождений, в особенности на месторождениях урана [91]. Результаты этих исследований отражены в работах В.А. Викентьева, И.А. Карпенко, М.В. Шумилина и других авторов [3, 4, 22, 23]. Было установлено, что предельная величина ошибок геометризации для

запасов категории  $C_1$  в сечениях может составлять от 30 % до 50 %. Для проекций рудных тел она не превышала 30 %.

С целью обоснования величины ошибки геометризации, достаточной для квалификации запасов по категории  $C_1$ , такого рода исследования проведены на обрабатываемых золоторудных месторождениях. При этом использованы детальные данные о морфологии рудных тел, которая была установлена при проведении сопровождающей эксплуатационной разведки. Анализ проведен по отдельным горизонтам горных работ и разрезам, для жиллообразных рудных тел изучались проекции рудных тел на вертикальную или горизонтальную плоскости. Для каждого из объектов исследований определены площадь в сечении или на проекции ( $S$ ), средние размеры: мощность ( $m$ ), ширина ( $h$ ) и длина ( $l$ ), – а также фрактальная размерность  $D$ . Кроме того, для шага сети или площади ячейки, соответствующих параметрам сети, принятой для разведки запасов категории  $C_1$ , получены эмпирические оценки ошибок геометризации (ОГ). Величина ошибок вычислена как среднее из 4 - 5 вариантов наложения сети. Кроме эмпирических оценок приведены расчетные значения ОГ по выражениям (4.3) и (4.5).

Результаты исследований ошибок геометризации по сечениям (разрезам и планам горизонтов) представлены в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Морфологические характеристики и ошибки геометризации по сечениям для категории  $C_1$

Месторождение	Объект	D	S, м <sup>2</sup>	m, м	L <sub>ист</sub> , м	Шаг, м	Ошибки геометр-ции %	
							эмпир	аналитич.
Албазинское,	разрез 7	1,431	7930	8,9	36,0	50	28,2	34,2
Албазинское,	разрез 5	1,394	14490	13,5	44,5	50	18,0	20,5
Александровское	план гор.	1,401	8200	13,6	29,5	50	39,0	42,4
Многовершинное	план гор.	1,352	11938	10,6	50	60	41,6	37,5
Павлик	разрез 17	1,436	7500	11,0	25,5	50	42,5	49,2
Павлик	гор. 764	1,418	14900	18,2	33,0	50	33,5	34,5
Наталкинское	гор. 870	1,251	24028	13,5	67,0	100	39,5	37,5
Наталкинское	гор. 855	1,286	35276	21,5	110	100	28,4	22,7
Наталкинское	гор. 862,5	1,321	40522	23,6	108	100	25,2	23,1
Джусинское	разрез	1,272	3125	9,5	33,6	50	36,0	37,2
Березняковское	гор. 190	1,485	5650	11,7	17,7	20	32,6	28,2
Первенец рз 1	план гор.	1,252	2115	6,6	16,6	20	30,7	30,1
Первенец рз 2	план гор.	1,234	2375	5,1	15,4	20	34,5	32,5
Вернинское	гор. 920	1,313	45023	55,1	119	50	8,1	10,5
Вернинское	гор. 870	1,243	42412	48,3	106	50	15,1	11,8

Эмпирические оценки ошибок геометризации в сечениях для исследованных месторождений при шаге сети, использованной для разведки запасов категории  $C_1$ , изменяются в пределах от 8,1 % - 42,5 %. Эти значения в целом соответствуют предложениям о допустимой

величине этого критерия для других типов рудных месторождений [8, 12, 91]. Можно отметить, что расчетные (аналитические) значения достаточно близко совпадают с величинами, определенными эмпирическим путем.

Особенностью определения ошибок геометризации для жилородных рудных тел является необходимость их исследования на проекциях, что требует учета шага сети как по падению, так и по простиранию. Сходным образом влияние на величину ОГ параметров сети по ортогональным направлениям следует учитывать для штокверковых месторождений, не имеющих отчетливо выраженной анизотропии. В этом случае объектом исследований являются эксплуатационные горизонты горных работ, в пределах которых «истинная» форма рудных тел устанавливается по результатам опробования скважин БВР.

Исследования такого рода проведены на ограниченном количестве объектов в связи со сложностями получения детальной информации о данных эксплуатационного опробования на действующих предприятиях.

Результаты определения морфологических показателей на проекциях и в сечениях приведены в таблице 5.10. В ней указаны также результаты оценки эмпирических и аналитических ошибок геометризации (на основе выражения (4.6)) применительно к параметрам разведочной сети, выбранной для оценки запасов категории С<sub>1</sub>.

Таблица 5.10 – Ошибки геометризации для категории С<sub>1</sub> в сечениях и на проекциях рудных тел

Месторождение	Объект	D	Сеть, м	Площ. м <sup>2</sup>	Размеры, м			Ошибки геом-ции, %	
					m	h	l	эмпирич.	аналитич.
Майское рт 1	проекция	1,466	50x50	126000	..	65	75	16,7	25,4
Майское рт 2	проекция	1,478	50x50	79200	..	57,1	62,4	27,5	29,6
Двойное 37/4	проекция	1,439	25x50	15150	..	28,9	58,0	28,6	30,5
Дарасун	проекция	1,448	60x20	53600	-	67	33	25,6	27,0
Боковое г 480	сечение	1,344	25x10	7500		16,3	15,1	29,4	28,3
Березитовое	сечение	1,385	40x40	18450		46,2	48,9	26,9	27,4
Белая Гора г130	сечение	1,410	50x50	28750		55,9	60,8	28,2	30,5

Полученные результаты показывают, что фактические ошибки геометризации при оконтуривании рудных тел на проекциях и в сечениях по разведочной сети, принятой для категории С<sub>1</sub>, не превышают 30 %. Этот вывод также согласуется со сделанными ранее предложениями о предельных значениях этого критерия [8, 12, 91, 94]. Аналитические расчеты также показывают достаточно хорошую сходимость с эмпирическими определениями ошибок геометризации, что позволяет использовать их для оценки погрешности оконтуривания на ранних стадиях работ.

Величину предельных значений ошибок геометризации можно рассмотреть с позиций зарубежной практики квалификации запасов. Само понятие «ошибки геометризации» в ней не рассматривается. Вместе с тем определение категории запасов/ресурсов предусматривает анализ



вариограмм, в соответствии с которым возможности квалификации ресурсов категории indicated ограничивается шагом сети, соизмеримым с пороговым расстоянием. Если принять, что пределы корреляции соответствуют средним размерам рудных тел для данного направления, то величина ошибок геометризации по аналитическому выражению (4.5) составит 20 % - 25 %. Для ресурсов категории measured допустимые пределы этих ошибок могут составлять 10 % - 20 %.

### **5.3 Экономические обоснование значений критериев разведанности**

Проведенными выше исследованиями определены эмпирически сложившиеся требования к погрешности оценки параметров запасов. Вместе с тем эти требования могут быть рассмотрены с позиций экономических рисков освоения месторождений. В этом отношении применение количественных критериев разведанности имеет большое практическое значение, важность которого в настоящее время недооценивается.

В соответствии с существующими нормативно-методическими положениями при представлении на Госэкспертизу материалов подсчета запасов требуется проведение анализа чувствительности проектов.

В соответствии с Методическими рекомендациями [68] анализ проводится относительно следующих основных показателей:

- цен на товарную продукцию;
- капитальных затрат;
- операционных расходов.

Ошибки в оценке запасов и особенно содержаний полезного компонента в этом анализе не фигурируют, хотя они непосредственным образом сказываются не только на устойчивости проекта в целом, но и на эффективности работы предприятия по отдельным периодам.

Экономическая эффективность освоения месторождения определяется уровнем превышения стоимости получаемой товарной продукции относительно уровня всех расходов на добычу полезного ископаемого. Погашение этих расходов обеспечивается в случае, если содержание полезного ископаемого в обрабатываемых участках недр соответствует «минимальному промышленному» содержанию.

Фактические содержания компонента в блоках, планируемых к отработке за данный период, могут отличаться в большую сторону от минимального промышленного. Вместе с тем следует иметь в виду, что средние содержания, установленные по данным разведки, обладают случайными, а в ряде случаев и систематическими ошибками, которые определяют риски освоения месторождения.

Вероятность безубыточной работы предприятия за определенный период времени может быть оценена на основе изложенных выше подходов к оценке погрешности средних значений

признака. Как правило, на начальных этапах работы предприятия предполагается отсутствие систематических ошибок, во внимание принимаются только случайные погрешности, уровень которых связан с параметрами сети и степенью изменчивости содержаний. При известных значениях среднего ( $C_{cp}$ ) и минимального промышленного ( $C_{минпр}$ ) содержаний, а также относительной случайной погрешности оценки ( $S_{\phi}$ ) можно вычислить значение критерия Стьюдента по выражению:

$$t_a = (C_{cp} - C_{минпр}) / C_{cp} * S_{\phi} \quad (5.1)$$

Полученное значение сравнивается с табличным и определяется доверительная вероятность  $\alpha$ . В качестве примера рассмотрим расчет значения критерия Стьюдента для следующих условий:  $C_{cp} = 1,3$  г/т,  $C_{минпр} = 1$  г/т,  $S_{\phi} = 0,15$ . Значение критерия Стьюдента будет равно 2, что приблизительно соответствует доверительной вероятности 0,95. При увеличении допущенной погрешности оценки до 0,2 доверительная вероятность становится менее 0,9.

Допустимая вероятность безубыточной работы предприятия может регулироваться недропользователем. В тех случаях, когда вычисленное ее значение считается неприемлемым, основным способом его повышения является увеличение разведанности запасов, то есть сгущение разведочной сети.

Погрешность оценки содержаний определяется разведанностью запасов, которая зависит как от стадии геологоразведочных работ, так и от соотношения запасов разных категорий на каждой из них. С этих позиций можно рассмотреть схему распределений погрешности оценки и соотношение их с минимальным допустимым содержанием ( $C_M$ ) по стадиям (Рисунок 5.4).

На стадии оценочных работ ошибки определения содержаний относительно велики. Заштрихованная область на рисунке характеризует вероятность получения убытков при отработке месторождения, при данной степени разведанности ее величина достаточно высока. На стадии разведочных работ величина погрешности оценки может существенно снижаться, риски освоения месторождения с позиций разведанности в данном примере минимальны.

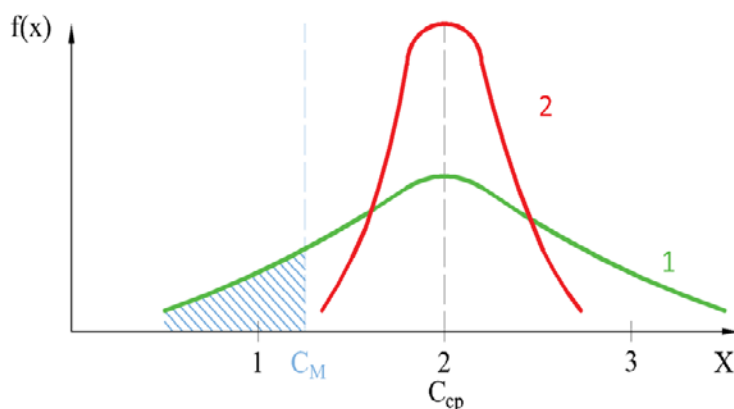


Рисунок 5.4 – Распределение погрешностей оценки на стадии оценочных (1) и разведочных работ (2)

Погрешности оценки запасов в целом для месторождения, приведенные к годовой производительности, могут быть вычислены с учетом соотношения запасов разных категорий. В существующих нормативно-методических документах [66, 68] это соотношение формально не регламентируется и устанавливается недропользователем. Очевидно, что высокая доля запасов категории  $C_2$  приводит к недостаточной надежности определения технико-экономических показателей и повышает риски освоения месторождений. Степень этих рисков может быть оценена на основе изложенных выше соображений.

На риски освоения месторождений сильное влияние оказывают систематические ошибки в оценке запасов. Особенно нежелательными являются ошибки в сторону их занижения. Схема распределений погрешности оценки содержаний при одинаковой изменчивости и плотности сети в условиях наличия систематической ошибки (1) и в условиях ее отсутствия (2) приведена на рисунке 5.5.

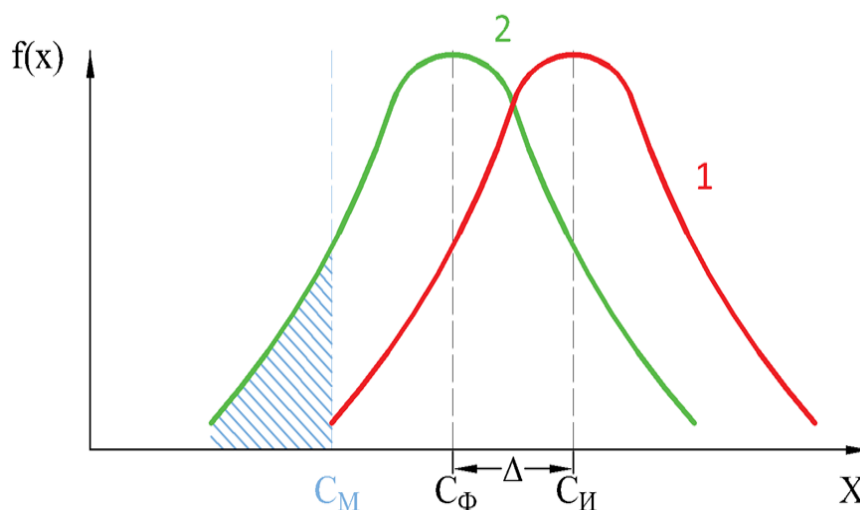


Рисунок 5.5 – Распределение погрешностей оценки содержаний при наличии (1) и отсутствии (2) систематической ошибки ( $\Delta$ )

Величина систематической ошибки  $\Delta$  вычисляется как разность между исходным содержанием ( $C_{II}$ ), определенным по данным разведки, и фактическим содержанием ( $C_\Phi$ ), установленным по данным эксплуатационной сопровождающей разведки. В первом случае риски освоения месторождения представляются минимальными. Во втором случае вероятность получения убытков (заштрихованная область кривой распределения) является достаточно высокой.

В процессе экспертизы запасов анализируются возможные причины искажения подсчетных параметров и проводятся процедуры по их устранению или снижению влияния. В случаях невозможности повысить достоверность параметров запасов каким-либо способом, в том числе за счет введения поправочных коэффициентов, категория запасов понижается.

Выявление систематических ошибок оценки запасов является одной из важных задач изучения месторождений на стадии отработки. Основным методом такого анализа является сопоставление ранее утвержденных запасов с результатами отработки [67].

Возможными причинами завышения содержаний на стадии разведки, как правило, являются:

- дефекты в документации горных выработок и скважин;
- неверная геологическая интерпретация строения объекта;
- низкая представительность и достоверность опробования;
- ошибки в выполнении аналитических работ;
- некорректная процедура оценки запасов.

Кроме отмеченных существует ряд причин, которые надежно могут быть выявлены только на стадии эксплуатационных работ. Главными из них, как показывает опыт сопоставления [46, 59], являются:

- несоответствие установленных кондиционных показателей условиям отработки месторождения;
- некорректное определение проектных потерь и разубоживания.

Допустимые предельные погрешности оценки запасов/содержаний, используемых для планирования добычных работ, могут быть оценены на основе изложенных положений, учитывающих как наличие разного рода ошибок, так и экономические риски, рассматриваемые с позиций вероятности безубыточной работы предприятия за определенный период времени.

Процедура приближенного расчета допустимой погрешности включает определение исходных данных, в том числе:

- оценку предельного (минимального) содержания полезного компонента;
- определение среднего содержания в запасах, предназначенных для отработки;
- экспертную оценку возможного систематического завышения содержаний с обоснованием и введением соответствующего поправочного коэффициента ( $K_{\text{попр}}$ );
- задание доверительной вероятности безубыточного освоения месторождения и выбор значения критерия Стьюдента.

На основе этих данных определяется поправка за систематическое смещение оценок среднего. Далее вычисляется относительная разность между исправленным значением и минимальным промышленным содержанием. Допустимая относительная погрешность оценки содержаний рассчитывается как отношение разности к величине коэффициента Стьюдента для заданной доверительной вероятности. В качестве примера можно рассмотреть процедуру расчета для следующих исходных условий:  $C_{\text{ср}} = 1,5$  г/т,  $C_{\text{минпр}} = 1,0$  г/т,  $K_{\text{попр}} = 0,8$ , доверительная

вероятность – 0,9,  $t_a = 1,6$ . Допустимая относительная погрешность  $S_d$  в этом случае будет равна:  $(1,5 \times 0,8 - 1,0) / 1,6 = 0,125$  или 12,5 %.

Допустимые риски в планировании отработки запасов на некоторый период времени и, соответственно, расчет погрешности оценки содержаний по предложенной процедуре могут быть положены в основу определения параметров сети опережающей эксплуатационной разведки.

В заключение стоит отметить, что низкая разведанность объектов и наличие разного рода ошибок в определении параметров запасов снижает их инвестиционную привлекательность и стоимостную оценку.

#### **5.4 Влияние критериев на оценку месторождения**

Рассмотренные критерии разведанности запасов в целом носят универсальный характер и применимы для месторождений твердых полезных ископаемых с разными типами минерального сырья.

Погрешность оценки запасов/содержаний имеет наибольшее значение для рудных месторождений, где основным геологоразведочным параметром являются содержания полезного компонента. Можно предполагать, что допустимые значения погрешностей являются разными для месторождений различных типов; например, для железорудных месторождений они должны быть ниже, чем для золотых. При этом ошибки в определении запасов собственно руды обладают наиболее «отдаленным» эффектом. В худшем случае дефицит запасов может привести к тому, что капитальные затраты не успевают окупиться. Такие ситуации являются достаточно редкими, так как в процессе разведки часто выявляется не весь сырьевой потенциал.

Ошибки геометризации для рудных месторождений имеют разное значение для условий открытой и подземной отработки. В условиях ОГР связь ошибок геометризации с экономикой не прослеживается напрямую, хотя они в определенной степени влияют на положение границ карьера. Корректная геометризация самих рудных тел в его пределах не играет существенной роли, в некоторой степени она сказывается на календарных планах отработки.

При подземной отработке, особенно объектов сложной морфологии, ошибки геометризации являются ведущим фактором, который зачастую определяет не подтверждение, прежде всего, запасов руды. Причина данного положения заключается в том, что пространство за пределами разведочного контура, даже выделенного по относительно редкой сети, обычно не рассматривается как объект последующего изучения более плотной сетью. В результате законтурные пространственные искажения становятся фактическими потерями в недрах. И наоборот, в разведочном контуре оказываются безрудные участки, наличие которых из-за редкой сети не предполагалось. Неверные представления о форме и пространственном положении

границ рудных образований приводят к ошибкам в проектировании горно-капитальных и горно-подготовительных выработок, а также в выборе систем отработки отдельных участков месторождения. При неизменном количестве запасов руды и ее качестве в недрах погрешности геометризации приводят к усложнению технологии разработки месторождения и увеличению затрат на добычу и переработку минерального сырья за счет неверного определения потерь и разубоживания. Экономический ущерб в каждой ситуации оценивается индивидуально.

Таким образом, корректировка параметров разведочной сети, ориентированная на ошибки геометризации, имеет более важное значение для подземных горных работ.

### **5.5 Типизация золоторудных месторождений для целей оценки и разведки**

Для выбора параметров разведочной сети на ранних стадиях геологоразведочных работ по золоторудным месторождениям может быть предложена их типизация, основанная на результатах выполненных исследований с учетом допустимых количественных значений критериев. Необходимость создания такой типизации определяется тем, что существующие в настоящее время рекомендации (МР) опираются на примеры месторождений, анализ изученности которых проводился 40 - 50 лет назад. Следует отметить, что достаточность той или иной сети с позиций критериев разведанности в то время не анализировалась. За прошедшее время резко возросло количество разведываемых и отрабатываемых золоторудных объектов, в их числе появились «крупнообъемные» месторождения типа штокверковых и минерализованных зон с относительно низкими содержаниями золота, которые ранее практически не рассматривались как объекты промышленного освоения.

Основные недостатки существующей группировки золоторудных месторождений заключаются в следующем:

- она базируется на неоднозначно определяемых характеристиках: коэффициентах рудоносности, вариации, показателе сложности;
- не учитывается наличие в пределах месторождения запасов, отрабатываемых разными способами и характеризующихся разной морфологией вследствие оконтуривания по разным условиям;
- включаются в третью группу объекты, различающиеся по размерам и запасам в несколько раз, которые требуют изучения разной сетью.

В целом представленная в Методических Рекомендациях [66] группировка является мало чувствительной к действительной сложности строения объектов.

Предлагаемая типизация (Таблица 5.11) не отвергает привычную классификацию и использует такое же деление на группы, ориентируясь, как и ранее, на учет морфологии оруденения. Вместе с тем она с большей детальностью учитывает в каждой группе масштаб

объектов в форме производительности горнодобывающего предприятия, а также степень изменчивости содержаний, которая характеризуется величиной коэффициента вариации содержаний по пробам длиной 1 м. При отклонении длины проб или композитов от данного значения величина коэффициента вариации корректируется. Дополнительно в типизации принимается во внимание различие в сложности строения через фрактальную размерность и морфологический тип оруденения.

Типизация ориентирована на выбор параметров сети для категории  $C_1$ , которую можно рассматривать как базовую относительно запасов других категорий.

Основным показателем, предложенным для определения параметров сети в типизации, является площадь ячейки. Конкретные размеры сторон ячейки предлагается вычислять отдельно с учетом ожидаемой анизотропии объекта.

Параметры сети оценены с использованием погрешности оценки содержаний, которая имеет несколько разные значения для объектов в зависимости от их масштаба. В соответствии с проведенными ранее исследованиями для крупных и уникальных по запасам месторождений принято предельное значение погрешности 10 %. Для средних месторождений значение критерия принято равным 12.5 %. Для мелких месторождений, относящихся преимущественно к 4-ой группе сложности, принята допустимая погрешность 15 %. Для определения параметров сети использованы как прямые расчеты, так и вспомогательные графики-номограммы, приведенные ранее на рисунках 4,6, 4,7, 4,8.

Результаты оценки площади ячейки сети для запасов категории  $C_1$  с разделением объектов по классификационным признакам представлены в таблице 5.11.

Типизация использует показатели, достаточно просто определяемые на ранних стадиях работ по фактическим данным или на основе аналогии. Она позволяет корректировать параметры сети в пределах единого объекта по способам отработки. На ее основе может даваться оценка категоричности запасов по отдельным частям месторождений.

Таблица 5.11 – Типизация золоторудных месторождений для целей разведки запасов категории  $C_1$

Группа	Масштаб, запасы руды	А, млн т/год	Морфологический тип	D	площадь ячейки (м <sup>2</sup> ) при коэфф. вариации по пробам			
					1,5	1,5-2,5	2,5-3,5	более 3,5
2	Уникальные и крупные, более 250 млн т руды	более 15	штокверки	1,4-1,6	15000	7500	3500	-
			минерализованные жильно-прожилковые зоны	1,3-1,4	16000	8000	4000	-
			залежи прожилково-вкрапленных руд	1,1-1,3	18000	10000	5000	-

Продолжение таблицы 5.11

Группа	Масштаб, запасы руды	А, млн т/год	Морфологический тип	D	площадь ячейки (м <sup>2</sup> ) при коэфф. вариации по пробам			
					1,5	1,5-2,5	2,5-3,5	более 3,5
2	Крупные, 100-250 млн т руды	5-15	штокверки	1,4-1,6	8000	4000	2500	-
			минерализованные жильно-прожилковые зоны	1,3-1,4	10000	5000	3000	-
			залежи прожилково-вкрапленных руд	1,1-1,3	12000	6000	3000	-
			жилы простого строения	1,1-1,2	10000	5000	2500	-
3	Средние, 20-100 млн т руды	1,5-5	штокверки	1,4-1,6	6000	3000	2000	-
			минерализованные жильно-прожилковые зоны	1,3-1,4	6000	3500	2500	-
			залежи прожилково-вкрапленных руд	1,1-1,3	6000	3500	2500	-
			жилы простого строения	1,1-1,25	5000	3000	2000	-
	жилы сложного строения	1,25-1,5	4000	2500	1500	-		
	Мелкие, 5-20 млн т руды	0,5-1,5	минерализованные жильно-прожилковые зоны	1,3-1,4	2500	1200	800	500
			залежи прожилково-вкрапленных руд	1,1-1,3	2500	1200	800	500
			жилы простого строения	1,1-1,3	2500	1200	800	500
			жилы сложного строения	1,3-1,4	2000	1000	600	400
			трубообразные тела	1,0-1,2	2500	1200	800	500
минерализованные жильно-прожилковые зоны			1,3-1,5	1500	800	600	400	
4	Весьма мелкие, менее 5 млн т руды	менее 0,5	залежи прожилково-вкрапленных руд	1,1-1,3	1500	800	600	400
			жилы простого строения	1,1-1,3	1500	800	600	400
			жилы сложного строения	1,3-1,5	1200	600	400	300
			трубки и трубообразные тела	1,0-1,2	1500	800	600	400
			минерализованные жильно-прожилковые зоны	1,3-1,5	1500	800	600	400

Принципы, на которых построена типизация, допускают внесение в нее изменений, связанных с переоценкой требований к изученности запасов.

Предлагаемые параметры сети могут уточняться с учетом требований к величине ошибки геометризации.

*На основе выполненных исследований к защите предлагается тезисное положение 3.*

***Оценка разведанности запасов золоторудных месторождений базируется на двух количественных показателях/критериях: погрешности оценки средних содержаний и***



*ошибки геометризации. Данные критерии имеют универсальное значение для всех классификаций, в том числе для стандартов шаблона КРИРСКО.*

*Исследованиями, проведенными по разработанной методике, впервые установлено, что фактический уровень относительных стандартных погрешностей оценки содержаний для категории С<sub>1</sub> применительно к блокам годовой производительности находится в пределах 10 % - 15 %. Высокий уровень точности оценки (10 % - 12 %) характерен для крупных и средних месторождений, для мелких и весьма мелких он снижается до 15 %.*

*Установлено, что фактические значения ошибок геометризации золоторудных месторождений для запасов категории С<sub>1</sub> составляют 30 % - 50 %, что соответствует их уровню для месторождений других типов ТПИ.*

*Корректировка допустимых значений критериев для конкретных объектов должна проводиться с учетом экономических рисков их освоения.*

## 6 КВАЛИФИКАЦИЯ ЗАПАСОВ

### 6.1 Основные положения квалификации запасов/ресурсов в отечественной и зарубежной практике оценки

Квалификация запасов является операцией, завершающей оценку разведанности запасов. Она осуществляется по конкретным подсчетным блокам, выделение которых должно проводиться с учетом их геологической, горнотехнической и технологической однородности [14, 31, 43, 66, 73, 82].

В отечественной практике оценки месторождений разведанность отдельных подсчетных блоков традиционно осуществляется на качественном уровне методом экспертных оценок, который опирается на определенные эмпирически сложившиеся правила. Решающую роль при этом играют опыт и квалификация исполнителей или экспертов ГКЗ. Использованию количественных подходов препятствовало отсутствие установленных критериев разведанности и их предельных значений для разных категорий запасов. Кроме того, не были определены требования по применению этих критериев к блокам разного размера.

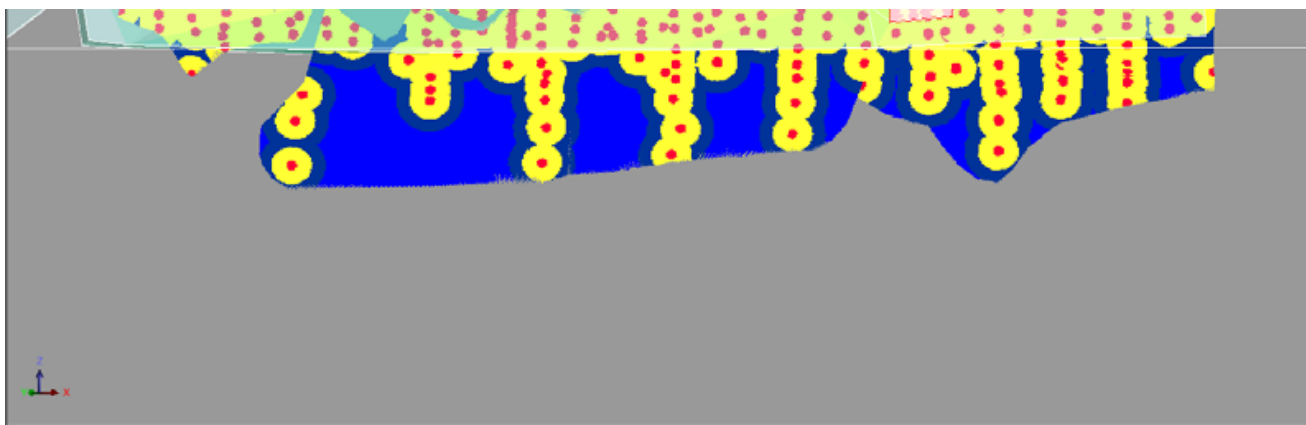
Основное внимание при решении данной задачи уделяется фактической плотности разведочной сети и ее соответствию сети, рекомендованной для данной группы сложности геологического строения объекта. В меньшей степени учитываются морфологические особенности оруденения, в том числе мощность рудного тела, его положение относительно границ наиболее крупных рудных тел. При подсчете запасов с применением коэффициента рудоносности учитывается его величина, части залежей с коэффициентом рудоносности менее 0.5, как правило, квалифицируются по категории С<sub>2</sub>. Кроме того, к этой же категории относятся запасы блоков, опирающихся на малое число (менее 3 - 4) разведочных пересечений. При наличии 1 - 2 изолированных пересечений скопления полезного ископаемого относятся, как правило, к прогнозным ресурсам категории Р<sub>1</sub>.

Следует отметить, что использование этих правил не во всех случаях приводит к однозначным результатам. Например, присоединение к залежи единичных пересечений, принадлежность которых к определенным рудоносным структурам не вызывает сомнений, позволяет оценивать характеризуемые ими запасы по относительно высоким категориям.

В зарубежной практике [1, 95, 99, 100] для количественной квалификации запасов/ресурсов основное значение придается вариограммам, по которым определяются радиусы корреляции. Квалификация проводится не по подсчетным блокам, а по группам ячеек, расположенных относительно разведочных пересечений на расстоянии, не превышающем определенный предел. Для ресурсов категории measured предельная величина этого расстояния

часто соответствует уровню 0,6 от максимального значения вариограммы. Для ресурсов категории *indicated* в качестве ограничения предлагается брать расстояние, при котором случайная составляющая дисперсии достигает 0,8 от ее общей величины (*sill*). Эти расстояния принимаются для определения размеров поискового эллипсоида при каждом из «прогонов» модели. Первый прогон выделяет ячейки, соответствующие ресурсам категории *measured*, второй – категории *indicated*, а третий – категории *inferred*. В редких случаях может быть выполнен четвертый прогон при размерах эллипсоида, соответствующих максимальным расстояниям между пересечениями в пределах объекта. Ресурсы в ряде данных случаев относятся к «неклассифицируемым» (*unclassified*).

В качестве примера такой ситуации можно привести результаты оценки ресурсов урановорудного месторождения Южное (Ю. Якутия) одной из зарубежных консалтинговых фирм (Рисунок 6.1).



*Рисунок 6.1 – Проекция на вертикальную плоскость нижних горизонтов зоны Южная; синей заливкой показаны «неклассифицируемые» скопления полезного ископаемого*

В практике оценки месторождений принципы определения размеров эллипсоида по характеристикам вариограмм соблюдаются не всегда. Как правило, это обусловлено невозможностью их надежного построения из-за недостаточной плотности разведочной сети. Обычно на золоторудных месторождениях любого размера для квалификации ресурсов по категории *measured* принимается расстояние менее 40 м, для ресурсов категории *indicated* оно составляет от 40 до 80 м. При больших расстояниях ресурсы квалифицируются по категории *inferred*.

Кроме расстояний между разведочными пересечениями при квалификации запасов учитываются также число проб, которые участвуют в интерполяции содержаний в ячейки модели, и количество выработок. Принципы этого учета могут характеризоваться в виде таблиц, где указаны признаки и их значения для каждой из категорий. Пример квалификации ресурсов в разрезе месторождения на основе изложенных принципов показан на рисунках 6.2 и 6.3.

		Number of Composites								
count n_STDEV STDEV		1	2	3	4	5	6	7	8	Row Total
>=	0	0	22	0	0	0	0	0	43	65
<	25.0	.00	.79	.00	.00	.00	.00	.00	.35	54
<b>Measured</b>										
>=	25.0	6	93	17	19	3	23	0	2309	2470
<	50.0	1.10	.95	.75	.50	.46	.43	.00	.39	2386
<b>Indicated</b>										
>=	50.0	60	205	57	188	27	225	33	23581	24156
<	75.0	.88	1.01	.77	.61	.56	.50	.48	.46	23799
<b>Inferred</b>										
>=	75.0	106	295	135	505	251	878	316	27956	30442
<	100.0	.96	.98	.84	.77	.73	.62	.61	.53	29412
>=	100.0	131	378	170	733	301	1060	650	12244	15667
<	125.0	1.02	.97	.94	.86	.83	.72	.68	.60	14712
>=	125.0	142	561	173	414	206	547	288	1825	4155
<	150.0	.99	.98	.97	.91	.86	.84	.81	.70	3204
>=	150.0	129	438	82	134	45	128	50	75	1059
<	175.0	1.04	1.03	1.04	.98	.91	.87	.90	.88	488
<b>Inferred</b>										
>=	175.0	123	179	10	4	0	0	0	0	316
<	200.0	1.06	1.06	1.07	.98	.00	.00	.00	.00	63
>=	200.0	12	6	0	0	0	0	0	0	18
<	225.0	.98	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	98
Column Total		708	2177	644	1977	832	2858	1317	6783.5	78348
		1.00	.99	.92	.82	.80	.69	.69	.52	741.18

Рисунок 6.2 – Таблица расстояний (по направлениям) между пересечениями с указанием их числа и количества проб для квалификации ресурсов по категориям *measured*, *indicated* и *inferred*

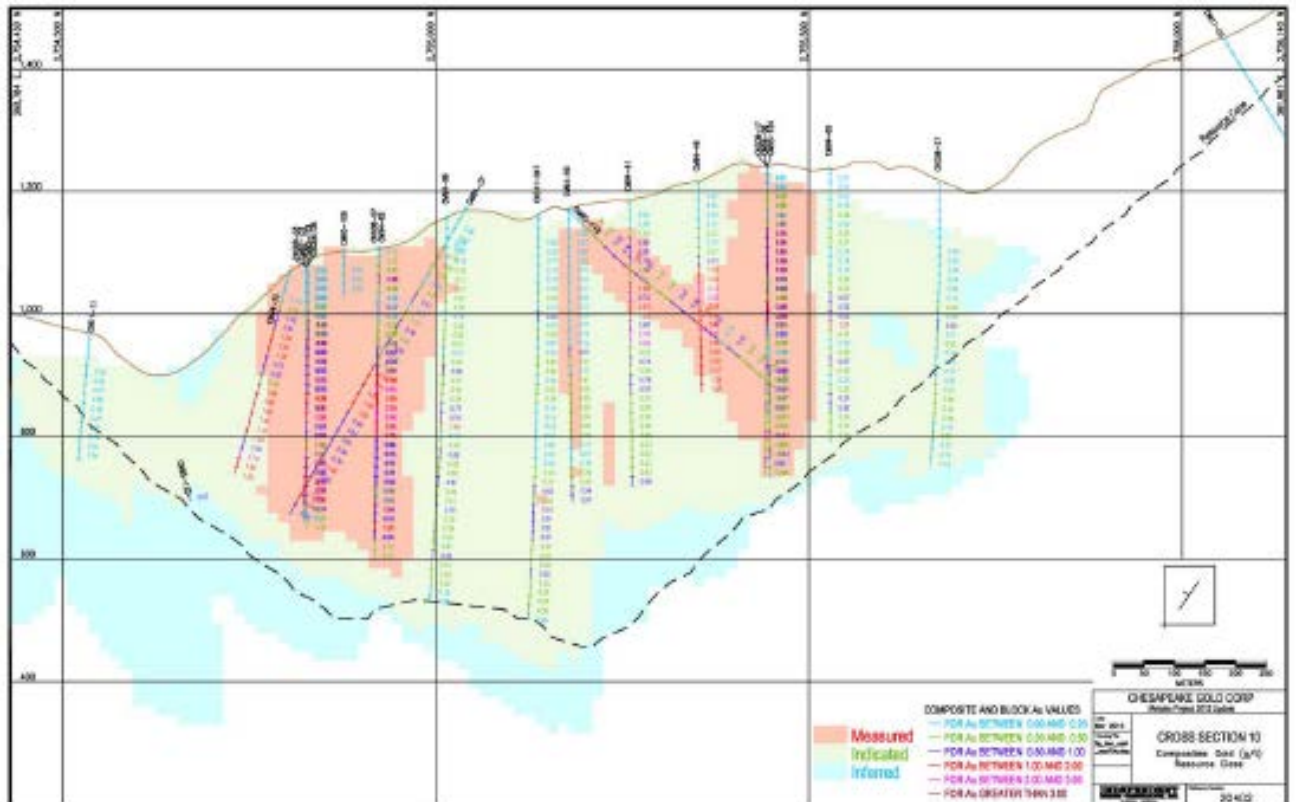
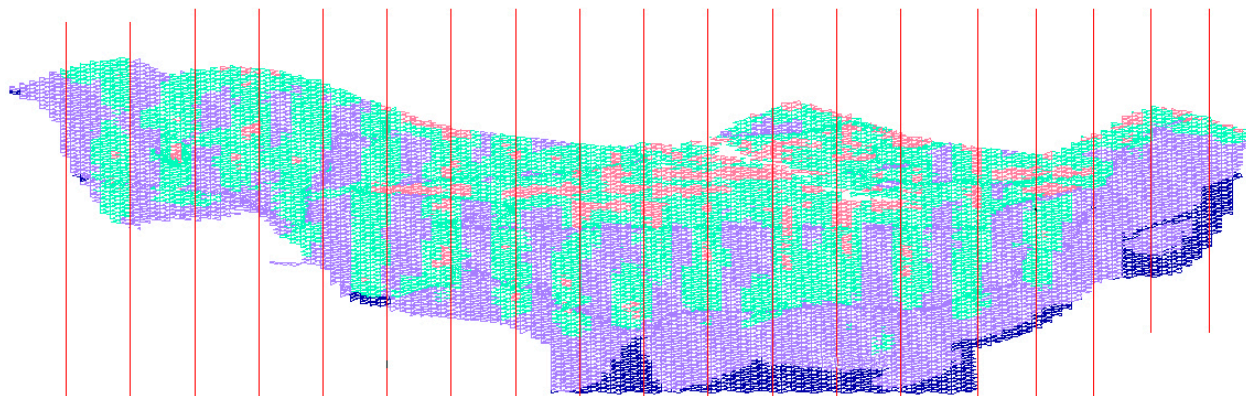


Рисунок 6.3 – Расположение ячеек моделей по категориям ресурсов в разрезе месторождения

В качестве примера квалификации запасов/ресурсов на отечественных объектах можно рассмотреть их результаты по Наталкинскому золоторудному месторождению, полученные в рамках международного аудита [108].

В настоящее время месторождение относится к объектам, предназначенным к отработке открытым способом. При оконтуривании по бортовому содержанию 0,4 г/т оно характеризуется как линейный мегаштокверк протяженностью более 4 км и шириной до 1 км. Верхняя часть месторождения было разведана горизонтами горных работ с шагом 40 - 50 м по падению, запасы были квалифицированы в основном по категории В. Запасы нижней части месторождения, изученной бурением по сети 50×200 м, были квалифицированы в основном по категории С<sub>1</sub>.

Аудитом по данным вариографии были приняты зоны экстраполяции 15, 60 и 120 м для квалификации ресурсов категорий *measured*, *indicated* и *inferred*, соответственно. Ее результаты иллюстрируются рисунке 6.4.



*Рисунок 6.4 – Квалификация ресурсов категорий *measured* (красное), *indicated* (зеленое) и *inferred* (голубое) Наталкинского месторождения по данным международного аудита [108] с использованием заданной зоны экстраполяции*

Видно, что промежутки между буровыми профилями, заданными через 200 м, содержат запасы, относимые к категории *inferred*, которые в соответствии со стандартами шаблона КРИРСКО исключаются из технико-экономических расчетов. Таки образом, с позиций подготовленности к промышленному освоению месторождение считается недоразведанным.

Другим примером квалификации запасов на основе такого подхода является Нежданинское золоторудное месторождение, которое относится к морфологическому типу минерализованных зон. Основная часть запасов локализуется в зоне № 1, которая прослежена по простиранию почти на 3 км, а по падению – более чем на 1000 м. Мощность зоны составляет в среднем 15 м.

Месторождение в верхней части было разведано канавами и горизонтами горных работ с шагом 100 м по глубине, запасы между горизонтами квалифицировались по категории С<sub>1</sub>, а на участках детализации, созданных бурением колонковых скважин между горизонтами, по

категории В. Нижние горизонты оценивались бурением по сети  $(50 - 70) \times (100 - 200)$  м, запасы здесь квалифицировались по категории  $C_2$ .

Оценка ресурсов аудитом проведена по блочной модели. Для квалификации ресурсов категории *measured* была принята зона радиусом 20 - 25 м, для ресурсов категории *indicated* – радиусом 50 м. Для ресурсов категории *inferred* расстояние экстраполяции достигало 150 м. Результаты квалификация ресурсов показаны на рисунке 6.5.

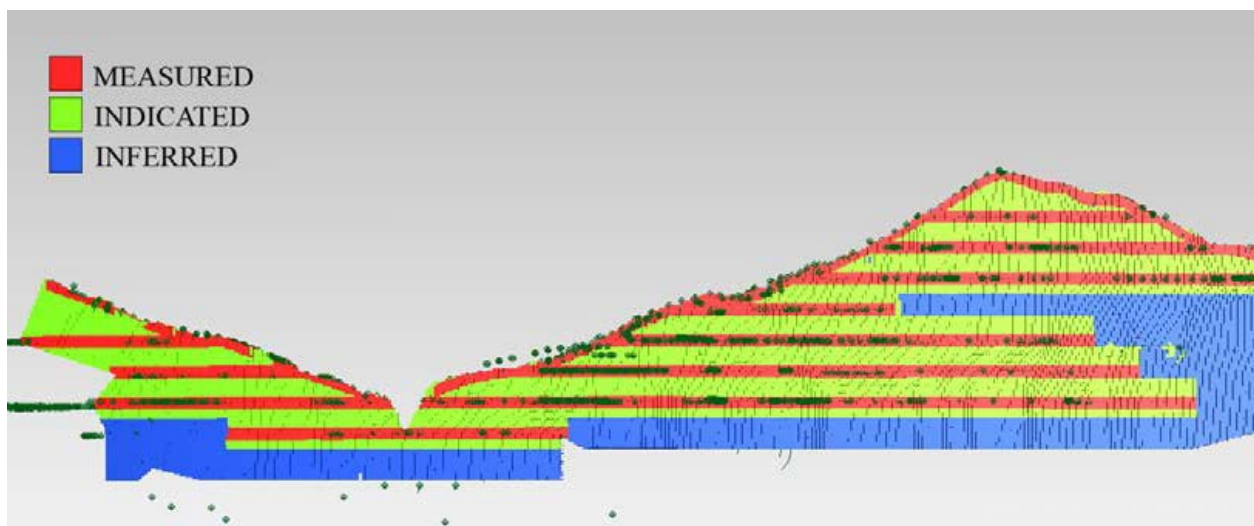


Рисунок 6.5 – Квалификация ресурсов категорий *measured* (красное), *indicated* (зелено-желтое) и *inferred* (голубое) Нежданинского месторождения по данным международного аудита по заданной зоне экстраполяции

Можно заметить, что в сравнении с принципами классификации запасов, принятыми в РФ, требования аудита к квалификации ресурсов являются более «строгими». Значительная часть запасов на месторождениях была отнесена аудитом к категории *inferred* и исключалась из геолого-экономической оценки. На Нежданинском месторождении часть запасов категории  $C_2$ , наличие которых на глубоких горизонтах было подтверждено бурением колонковых скважин, не получили аудитом квалификации ни по одной из категорий. Положение пересечений скважинами на проекции (Рисунок 6.5) отмечено зелеными точками.

Одним из недостатков квалификации ресурсов через заданную зону экстраполяции ряд зарубежных исследователей [98] считают сложную картину размещения блоков разных категорий, которая, по их выражению, напоминает «шкуру леопарда» (Рисунок 6.6).

Другим показателем, который обсуждается в литературных источниках [95, 99, 100] для квалификации ресурсов, является погрешность оценки содержаний. Следует отметить, что оценка таких погрешностей проводится по достаточно сложным методикам, в том числе по процедуре стохастического случайного моделирования (СТО), использующей в своей основе блочные модели [35].

Необходимость выполнения такого рода процедур связана с тем, что результаты блочного моделирования имеют «сглаженный» характер. Эта особенность иллюстрируется рисунке 6.7.



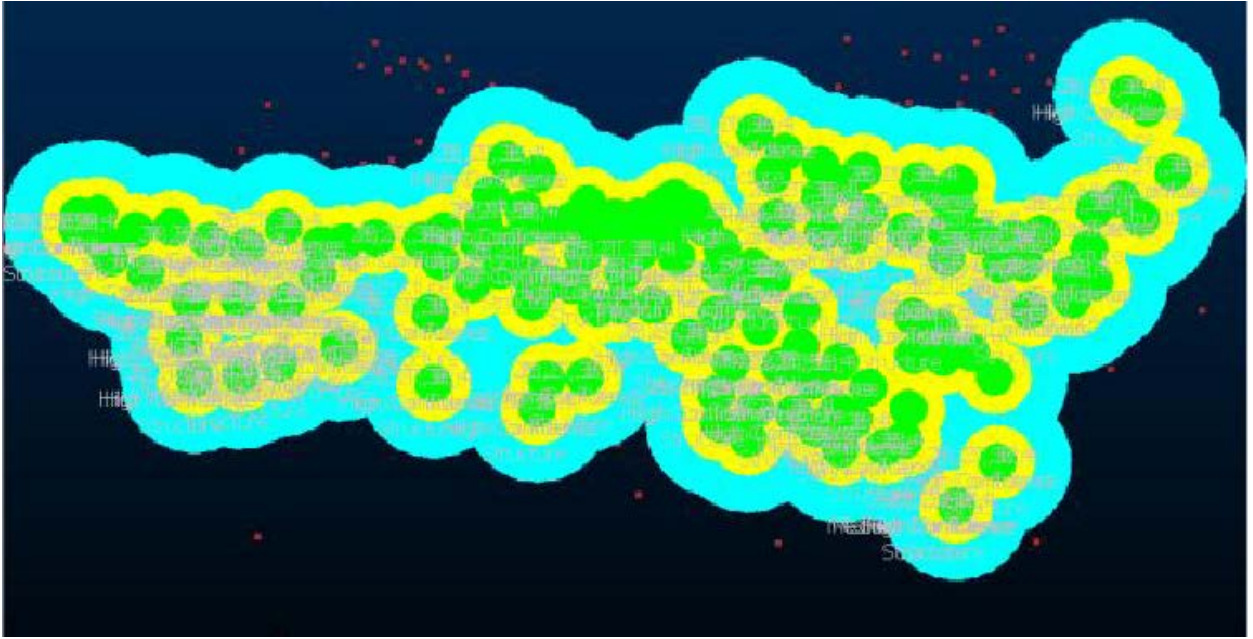


Рисунок 6.6 – Участки с разной квалификацией запасов/ресурсов в проекции на плоскости рудного тела: зеленое – категория *measured*, желтое – категория *indicated* и голубое – категория *inferred*

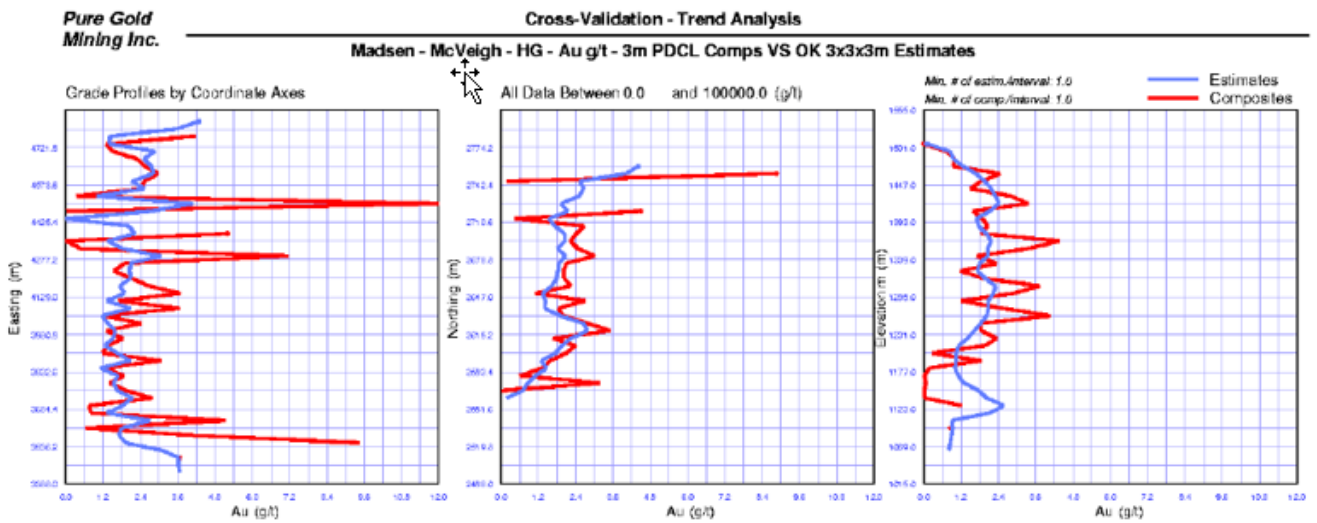


Рисунок 6.7 – Проявление «сглаживающего» эффекта при блочном моделировании жильного золоторудного месторождения Мадсон (Канада, [119])

На рисунке 6.7 приведены результаты «перекрестной» проверки (cross validation) в форме сопоставления содержаний золота в ячейках блочной модели (синий цвет) и в соответствующих им композитным пробам (красный цвет).

Степень этого сглаживания зависит как от выбранных параметров модели, так и от характера/детальности исходных данных. В связи с этим дисперсия кригинга, характеризующая изменчивость содержаний в ячейках модели, не является надежным показателем для оценки точности подсчета запасов/ресурсов. В представленном примере она почти в 2 раза ниже, чем по исходным данным (композитам).

Для устранения эффекта «сглаживания» в ячейки модели методом Монте-Карло вводится случайная компонента, величина которой увязывается с типом распределения и дисперсией исходных данных опробования. Варианты наложения случайной компоненты на блочную модель представлены на рисунке 6.8.

При исследованиях реализуется до 10 000 вариантов наложения. На основе различий в оценке ресурсов по каждой реализации вычисляется дисперсия, через которую определяется погрешность вывода среднего содержания. Далее величина этой ошибки используется для квалификации.

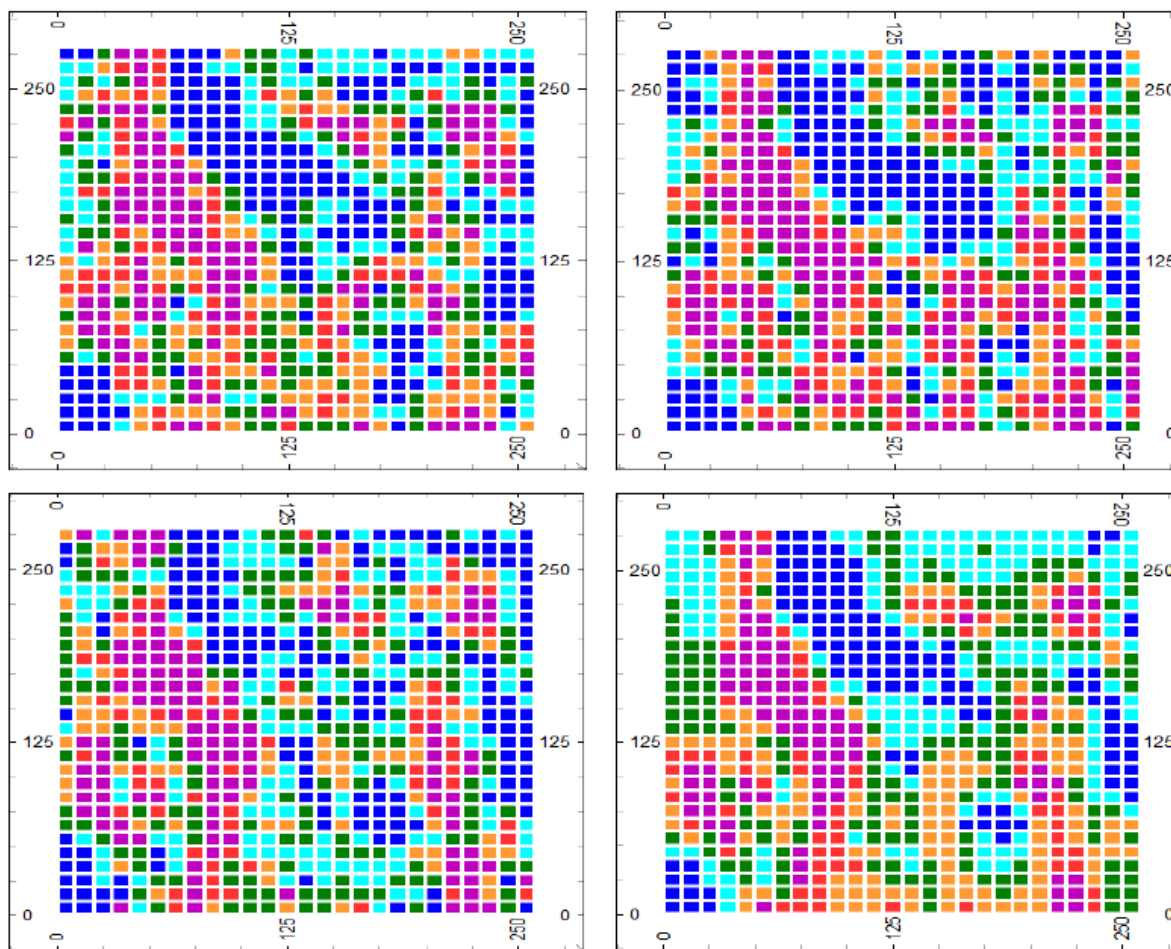


Рисунок 6.8 – Варианты интерполяции содержаний в ячейки модели по методу УС (симуляции)

В публичных отчетах о ресурсах/запасах месторождений [101-139] результаты таких расчетов практически не фигурирует. Можно заключить, что основным методом квалификации запасов/ресурсов является использование характеристик вариограмм, что соответствует отечественной практике применения ошибок геометризации как критерия разведанности.

Отмеченные приемы количественной оценки разведанности ресурсов/запасов формально не указаны в регулирующих документах и не являются обязательными. Они обсуждаются в различных публикациях и используются рядом аудиторских организаций, а также крупными горнодобывающими компаниями.



Одним из существенных недостатков предложенных процедур расчетов является то, что они ориентированы на использование блочного моделирования, проведение которого возможно только в условиях наличия достаточного объема исходных данных. На ранних стадиях геологоразведочных работ их применение практически невозможно.

Достаточно объективная квалификация запасов, существенно ограничивающая возможности разночтений, может даваться на основе общепринятых количественных подходов. Предпосылки для решения этой задачи связаны с рассмотренными выше (глава 4) основными положениями и результатами исследований.

## **6.2 Квалификация запасов на количественной основе - предлагаемый подход**

Квалификация осуществляется по данным геологоразведочных работ, когда появляется новая информация, позволяющая учитывать условия изучения объекта и его свойства в локальных участках недр. Различие условий оценки запасов по блокам предопределяет неоднозначность их квалификации в конкретных ситуациях. Объективность решения данной задачи обеспечивается использованием количественных подходов.

При проведении количественного анализа следует рассматривать:

- параметры сети, ее равномерность и число разведочных проб в подсчетном блоке;
- степень изменчивости геологоразведочных параметров, в том числе по отдельным геологически однородным участкам (доменам);
- характер пространственной изменчивости, в том числе наличие закономерной составляющей изменчивости, которая приводит к снижению фактических погрешностей в сравнении с упрощенным расчетом;
- морфологические особенности участка или блока, в том числе уменьшение или увеличение размеров и мощности рудных тел в сравнении со средними значениями;
- количество и качество руд в пределах подсчетного блока.

При квалификации запасов с позиций погрешности оценки средних содержаний основной интерес представляют параметры фактически созданной сети и характеристики изменчивости содержаний. В пределах конкретных блоков разведочная сеть по основным характеристикам: площади ячейки, размерам ее сторон, - может отличаться от сети, заданной на стадии проектирования работ для определенной категории запасов. Одной из причин таких отличий является неравномерность расположения пересечений, которая возникает как вследствие искривлений стволов скважин, так и в результате выборочной детализации на локальных участках внутри подсчетных блоков. Локальное сгущение сети в отдельных частях блока не повышает его изученность в целом, хотя с формальных позиций приводит к повышению числа проб в подсчетном объеме. Для устранения влияния этого фактора предварительно следует

провести декластеризацию разведочных пересечений. При выполнении этой операции следует стремиться к тому, чтобы анизотропия условно регулярной сети пересечений соответствовала анизотропии самого объекта. Далее в расчетах необходимо использовать параметры усредненных в результате декластеризации пересечений, наиболее важным в этом отношении показателем является количество проб в пересечении и в блоке в целом.

Изменчивость и коэффициент вариации содержаний на ранних стадиях геологоразведочных работ определяется для месторождения в целом или для его относительно крупных частей. После проведения разведочных работ появляется возможность уточнения этих показателей для подсчетных блоков или для их совокупности (доменов). Статистические характеристики распределений определяются с учетом результатов декластеризации.

Для геологически однородных участков – доменов – проводится геостатистический анализ, целью которого является оценка влияния закономерной составляющей изменчивости на определение величины погрешности. Процедура такого анализа с теоретических позиций в настоящее время однозначно не определена. Ее авторская версия включает следующие операции:

1. Применительно к каждому подсчетному блоку определяются параметры фактически полученной разведочной сети, в том числе шаг пересечений по падению и простиранию.

2. Относительно шага по вариограмме определяется дисперсия случайной составляющей изменчивости для заданного направления. Возможны ситуации, когда дисперсии по разным направлениям будут несколько различаться. В таких случаях для дальнейших расчетов принимается средняя дисперсия, вычисленная как взвешенная на число шагов сети по каждому из направлений в пределах блока. Исходя из средней дисперсии и среднего содержания компонента в блоке, вычисляется величина коэффициента вариации, используемая далее в расчетах.

3. Определение фактической погрешности оценки содержаний в блоке выполняется с учетом вариабельности признака и количества проб (декластеризованных) в блоке по выражению (2.5).

4. Разведочные блоки различаются количеством запасов в них, поэтому прямое сравнение погрешностей является некорректным. В связи с этим требуется их приведение к некоторому фиксированному количеству, в качестве которого ранее рассматривались запасы, соответствующие годовой производительности предприятия. Предварительно определяется соотношение запасов блока и запасов БГП. Пересчет погрешностей выполняется умножением на поправочный коэффициент, величина которого равна корню квадратному из полученного соотношения запасов. Финальная оценка погрешности является критерием, по которому производится классификация запасов по категориям.

В качестве примера проведения таких расчетов предлагается рассмотреть данные по одному из золоторудных месторождений типа минерализованных зон, относящегося к средним по масштабу (Таблица 6.1).

Таблица 6.1 – Погрешности определения содержаний и квалификация запасов по подсчетным блокам

Блок	Число проб	К вар	Запасы, тыс. т	Площ. на 1 пробу	Пр-ть, тыс.т/год	Соотношение	Погр-ть в блоке	Погреш. на год. пр	Квалиф.
4-C2	48	235	52	416	3000	0.017	33.9	<b>4.5</b>	C <sub>1</sub>
5-C2	57	235	17.9	122	3000	0.006	31.3	<b>2.4</b>	C <sub>1</sub>
6-C2	178	235	353	765	3000	0.118	17.6	<b>6.1</b>	C <sub>1</sub>
7-C2	574	235	1998	1338	3000	0.666	9.8	<b>8.0</b>	C <sub>1</sub>
8-C2	108	235	1000	3565	3000	0.333	22.6	<b>13.1</b>	C <sub>2</sub>
9-C2	350	235	1337	1468	3000	0.446	12.6	<b>8.4</b>	C <sub>1</sub>
10-C2	142	235	2291	6227	3000	0.764	19.8	<b>17.3</b>	C <sub>2</sub>
11-C2	429	235	2173	1946	3000	0.724	11.3	<b>9.7</b>	C <sub>1</sub>
12-C2	287	235	2278	3049	3000	0.759	13.9	<b>12.1</b>	C <sub>2</sub>
13-C2	336	235	499.2	572	3000	0.166	12.8	<b>5.2</b>	C <sub>1</sub>
14-C2	355	235	547.7	593	3000	0.183	12.5	<b>5.3</b>	C <sub>1</sub>
16-C2	168	235	1106	2528	3000	0.369	18.1	<b>11.0</b>	C <sub>2</sub>
17-C2	259	235	1197	1775	3000	0.399	14.6	<b>9.2</b>	C <sub>1</sub>
18-C2	382	235	1228	1238	3000	0.409	12.0	<b>7.7</b>	C <sub>1</sub>
19-C2	413	235	1119	1043	3000	0.373	11.6	<b>7.1</b>	C <sub>1</sub>

На месторождении предполагается отработка запасов подземным способом с годовой производительностью 3000 тыс. т. На стадии составления ТЭО кондиций запасы по основной части блоков были предварительно квалифицированы по категории C<sub>2</sub>, что отражено в первом столбце таблицы. Каждый из блоков характеризуется разным числом проб и величиной запасов. Декластеризация сети не проводилась, в связи с чем возможно некоторое занижение оценок погрешности. Блоки локализируются в единой рудной зоне, коэффициент вариации содержаний в пробах по всей группе блоков равен 235 %. Геостатистический анализ показал, что поправки за влияние закономерной составляющей дисперсии могут вводиться, если шаг сети по простиранию составляет менее 40 м, а по падению – менее 50 - 60 м. Средняя мощность рудных тел составляет 10 - 15 м, величина объемной массы при подсчете – 2,6 т/м<sup>3</sup>. Средняя длина проб в пересчете на истинную мощность – 1 м.

В таблице представлена (столбец 5) средняя площадь рудного тела, приходящаяся на одну пробу, ее условно можно принять равной площади ячейки созданной разведочной сети. Видно, что параметры сети по блокам различаются более чем на порядок. Фактические оценки погрешностей достигают 30 % - 34 %, особенно для блоков, характеризующихся небольшим количеством запасов. В столбце 7 указано соотношение запасов в блоке и запасов,

соответствующих годовой производительности предприятия. После приведения погрешностей к единому масштабу (БГП) получены итоговые оценки погрешности. Они изменяются от 2,4 % - 6 % для блоков с высокой плотностью сети до 17,3 % для блока с наибольшей площадью ячейки (6200 м<sup>2</sup>).

На основе полученных данных можно проводить квалификацию запасов по категориям. Если принять, что предельное значение относительного стандартного отклонения для запасов категории С<sub>1</sub> должно составить 10 %, то к категории С<sub>2</sub> следует отнести только блоки 8-С<sub>2</sub>, 10-С<sub>2</sub>, 12-С<sub>2</sub> и 16-С<sub>2</sub>, для остальных блоков величина погрешности ниже установленного предела и их запасы могут квалифицироваться по категории С<sub>1</sub>.

Требования к погрешности оценки содержаний в практических ситуациях могут несколько корректироваться для руд разного качества. При явно повышенных содержаниях полезного компонента в блоке (рудные столбы) запасы могут быть отнесены к категории С<sub>1</sub> даже при некотором снижении точности (до 12 % - 13 %), что не будет критичным для эффективного освоения месторождения.

На основании полученных данных можно говорить о том, что для отнесения запасов блоков подобного типа к категории С<sub>1</sub> необходимо иметь сеть с площадью ячейки не более 2400 м<sup>2</sup>.

Для уверенной квалификации запасов в блоках дополнительно необходимо определить возможную величину ошибок геометризации. Для приближенной оценки этого показателя можно воспользоваться результатами геостатистического анализа, установившего, что пороговые расстояния по простиранию составляют около 40 м, а по падению – менее 50 – 60 м. Принятые для категории С<sub>1</sub> параметры сети соответствуют этим размерам, в связи с чем ошибки геометризации могут составлять от 25 % до 40 % по данным направлениям. Этот уровень считается достаточным для квалификации запасов по данной категории.

В целом, как показывает опыт исследований на других золоторудных объектах, определение ошибок геометризации для квалификации запасов имеет вспомогательный характер. Обычно сети, приемлемые для получения погрешности оценки в пределах, допустимых для категории С<sub>1</sub>, обеспечивают и достаточную величину ошибок геометризации. Тем не менее, этот критерий особенно важен для блоков, занимающих краевое положение в минерализованной зоне или залежи. Его оценка необходима также в случаях, когда оруденение не прослеживается уверенно между двумя соседними пересечениями. При подсчете запасов в залежах с коэффициентом рудоносности менее 0,7 уровень ошибок геометризации может оказаться недостаточным для квалификации запасов по категории С<sub>1</sub>.

Во всех ситуациях достаточно эффективным средством для анализа ошибок геометризации является построение индикаторных вариограмм и сравнение предела корреляции

(range) с фактическим шагом сети; если шаг превышает пороговые расстояния, то квалификация запасов по категории  $C_1$  становится невозможной.

### 6.3 Сопоставление результатов квалификации запасов/ресурсов на основе зарубежных, отечественных и рекомендуемого подходов

Эффективность различных подходов к квалификации запасов, в том числе на количественной основе, можно оценить на примерах по конкретным объектам. Такое сравнение представляется важным с позиций гармонизации стандартов отчетности. Одним из таких объектов может служить золоторудное месторождение Намдини (Гана) [124]. Сопоставление, в соответствии с имеющейся информацией, проводится не по отдельным подсчетным блокам, а по участкам, различающимся плотностью созданной сети.

Месторождение локализуется в породах бирримской серии протерозоя и представляет собой минерализованную зону шириной до 300 м и длиной более 1000 м (Рисунок 6.9). Простирание зоны - ССВ с падением на ССЗ под углом около  $60^\circ$  (Рисунок 6.10).

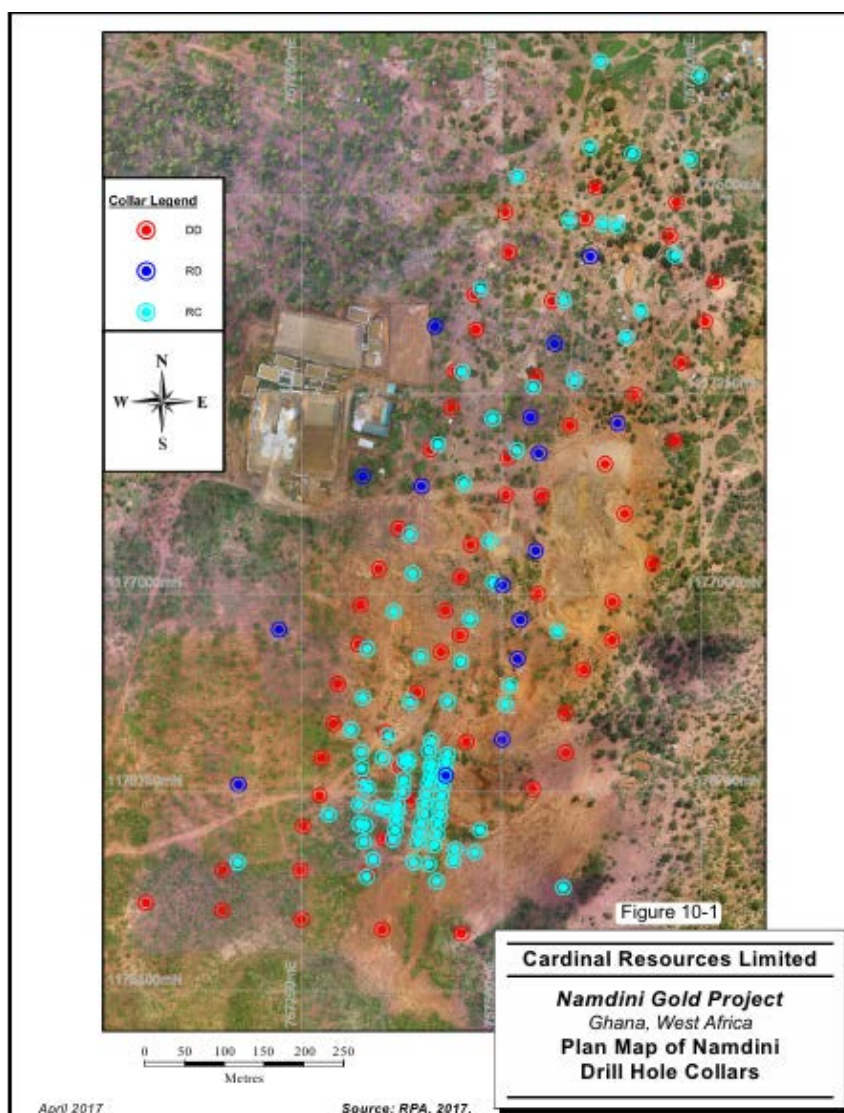


Рисунок 6.9 – План месторождения Намдини с положением разведочных скважин

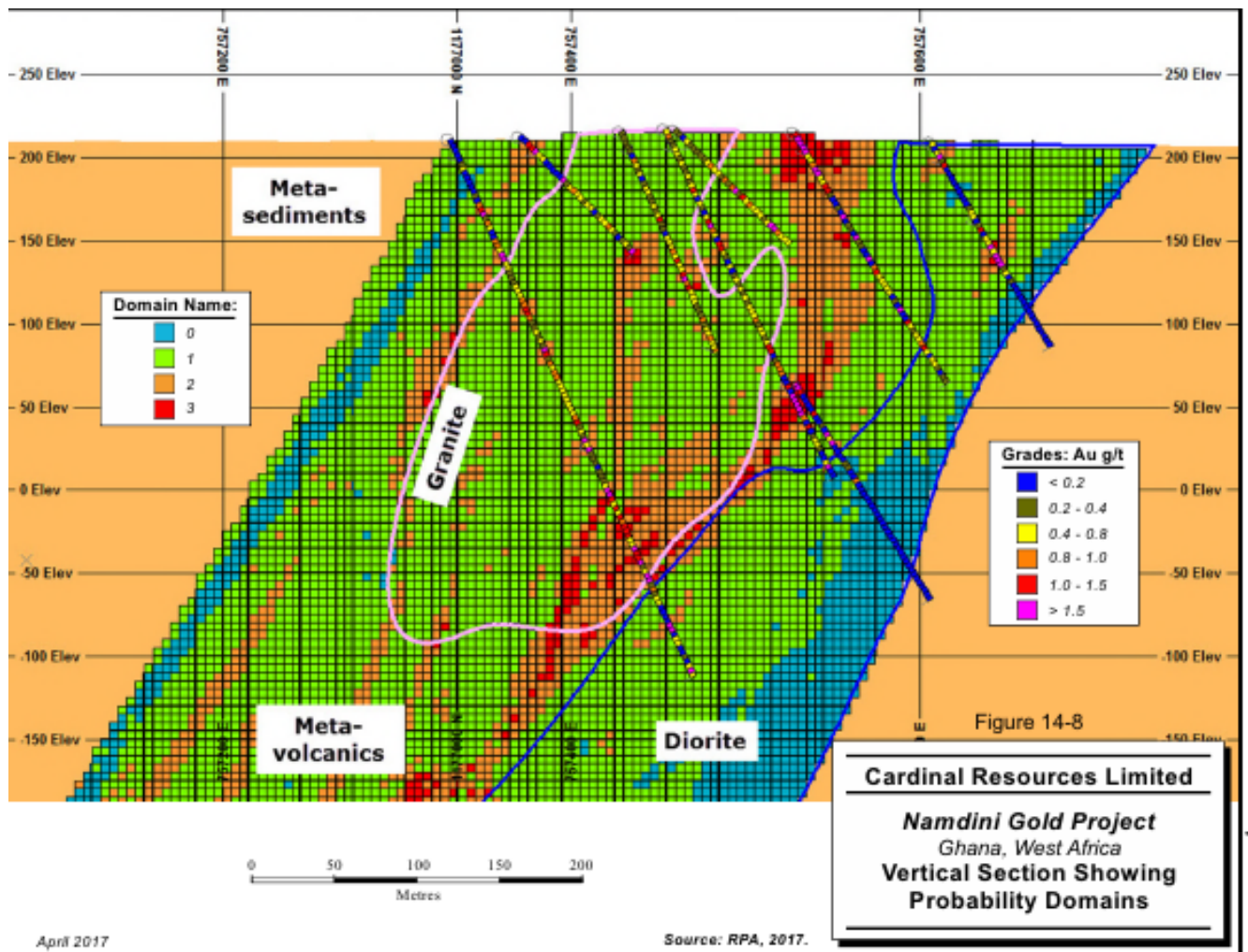


Рисунок 6.10 – Разрез месторождения Намдини с данными блочного моделирования

Основная часть месторождения разведана наклонными скважинами колонкового бурения по сети  $50 \times (50 - 80)$  м, причем сеть характеризуется значительной неравномерностью. В южной части имеется участок детализации, где создана сеть  $25 \times (10 - 15)$  м. Глубина разведки - около 250 м.

Средняя длина проб составляет 0,9 м, объемная масса пород вне зоны выветривания –  $2,8 \text{ т/м}^3$ . Коэффициент вариации содержаний золота по декластеризованным пробам в минерализованной зоне – 1,62.

Предел корреляции для нормализованных вариограмм, построенных по простиранию зоны – около 120 м, по падению – около 40 м. Уровень эффекта самородков – 0,4.

Подсчет запасов выполнен по блочной модели для вариантов минимальных содержаний в ячейке модели (cut-off grade) 0,3, 0,4, 0,5, 0,6 и 0,7 г/т.

Размер материнских блоков составил  $5 \times 10 \times 5$  м с субблокированием до  $2,5 \times 2,5 \times 2,5$  м. Моделирование осуществлялось в три прогона с размерами поисковых эллипсоидов  $40 \times 40 \times 5$  м,  $80 \times 80 \times 10$  м и  $200 \times 200 \times 25$  м.



В качестве оптимального был принят вариант cut-off grade 0,5 г/т. Запасы категории indicated для него составили: руда – 23,86 млн т, золото – 29,9 т при среднем содержании 1,21 г/т. Запасы категории inferred составили: руда – 100,15 млн т, золото – 116,7 т при среднем содержании 1,13 г/т (Рисунок 6.11).

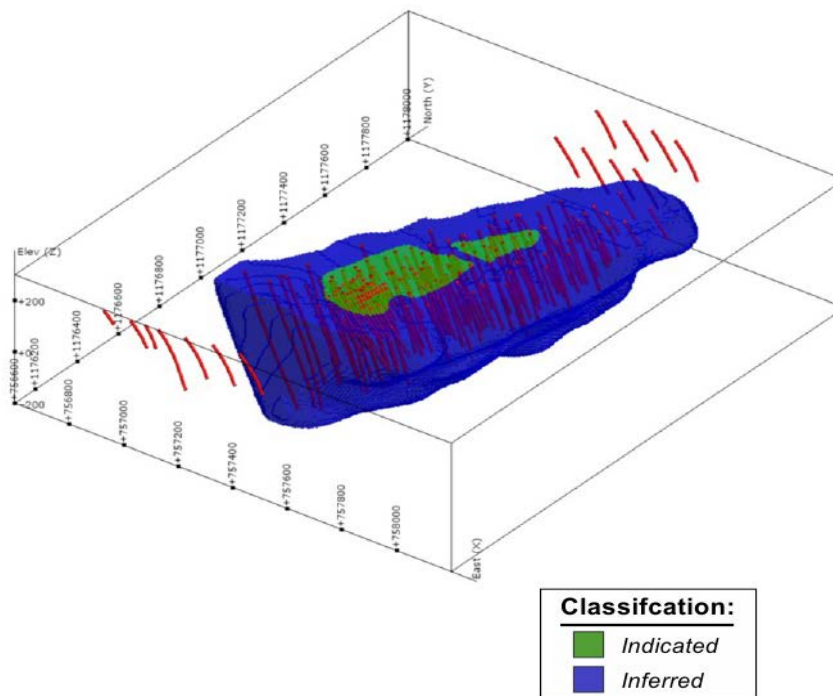


Рисунок 6.11 – Положение ресурсов категорий indicated и inferred в объеме месторождения

Как видно, из общего количества ресурсов 124 млн т более 80 % квалифицировано по категории inferred. Такая ситуация определяется, скорее всего, тем, что шаг сети по падению (50 м) больше предела корреляции – 40 м по этому направлению. Присвоение более высокой категории в этом случае считается невозможным.

Традиционный отечественный подход к квалификации запасов ориентируется на группу сложности геологического строения и на плотность имеющейся разведочной сети. По размерам и степени изменчивости содержаний данный объект заслуживает отнесения его к третьей группе классификации ГКЗ, для разведки которой рекомендуется сеть скважин  $(40 - 60) \times (40 - 60)$  м. С этих позиций запасы в пределах участка детализации уверенно могут быть классифицированы по категории В. В оставшейся части месторождения вследствие неравномерности сети имеются участки, где площадь ячейки составляет от 2500 до 3000 м<sup>2</sup>, что позволяет классифицировать часть запасов здесь по категории С<sub>1</sub>. Имеющаяся сеть позволяет квалифицировать остальную часть запасов по категории С<sub>2</sub>. В целом, если считать, что категория С<sub>1</sub> является аналогом категории ресурсов indicated, описанная ситуация соответствует пространственному распределению ресурсов по категориям, приведенному на рисунке 6.11. При более детальном анализе возможно некоторое изменение соотношения между количеством запасов по категориям.

Таким образом, по степени разведанности и соотношениям категорий запасов данное месторождение в рамках отечественного подхода, может быть, в полном объеме объектом геолого-экономической оценки при разработке временных и даже постоянных разведочных кондиций.

Предлагаемый количественный подход к оценке разведанности и квалификации запасов данного объекта требует задания некоторых дополнительных условий или допущений. Предельный уровень относительного доверительного интервала при вероятности 0,9 для ресурсов категории indicated принимается равным  $\pm 15\%$ . Если учесть, что для доверительной вероятности 0,9 при большом объеме выборки значение критерия Стьюдента составляет 1.65, то допустимое относительное стандартное отклонение составит  $9,1\%$  ( $15/1,65 = 9,1$ ). Для ресурсов категории measured эта величина снижается в два раза.

Средняя длина пробы с учетом угла «встречи» в пересчете на истинную мощность составит 0,75 м.

Ожидаемая производительность предприятия оценивается по формуле Тейлора исходя из условия, что в контур проектного карьера попадет около  $75\%$  всех оцененных ресурсов (Рисунок 6.12), а уровень разубоживания составит  $15\%$ . Исходя из принятых показателей, проектная производительность составит 5 млн т.

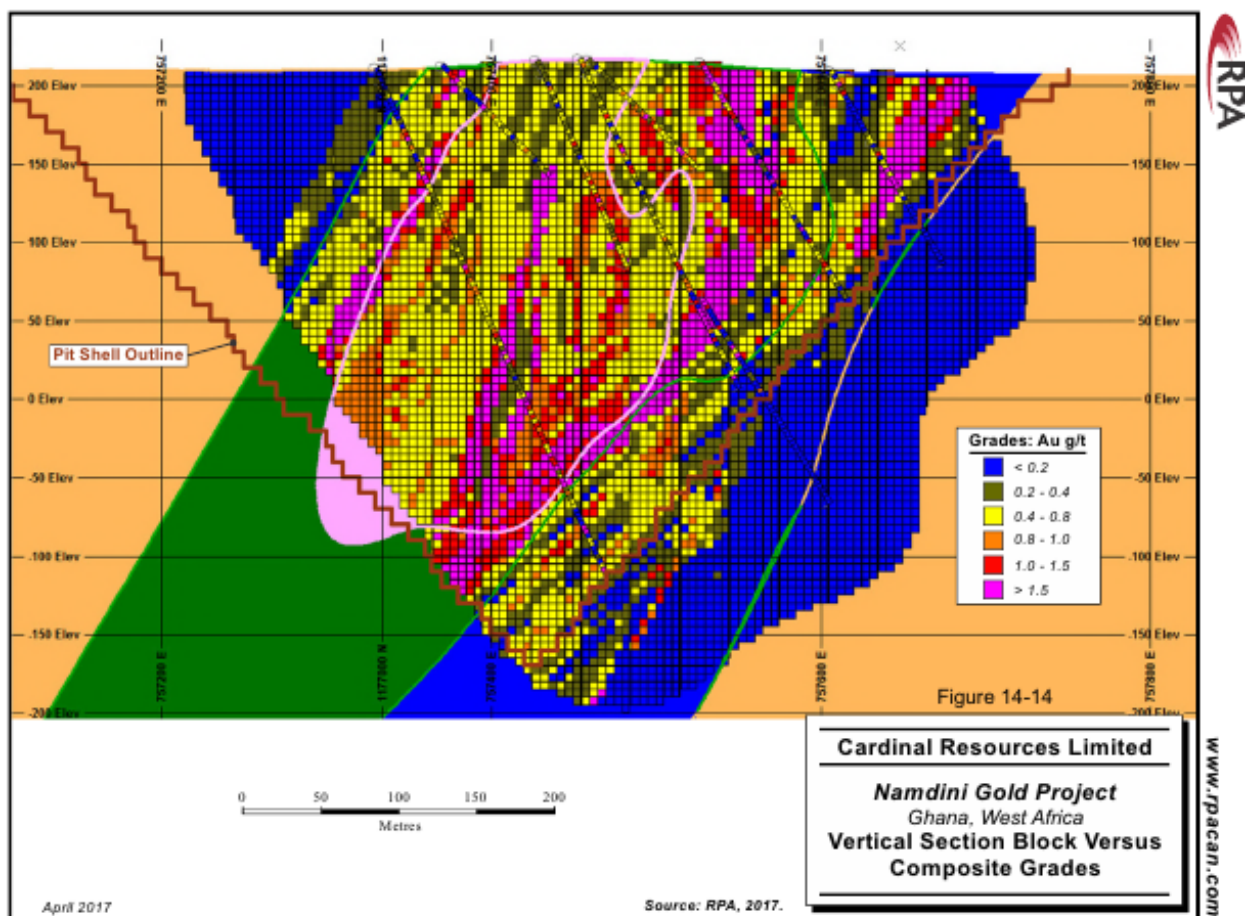


Рисунок 6.12 – Разрез месторождения с проектным контуром карьера



Расчеты погрешностей оценки средних содержаний для сетей различной плотности, имеющих на месторождении, приведен в таблице 6.2. В расчетах участвуют: заданная производительность (А, млн т), площадь ячейки сети ( $S_{\text{яч}}$ , м<sup>2</sup>), средняя длина пробы (L, м), объемная масса, количество руды, приходящейся на одну пробу ( $Q_{\text{проба}}$ , т), количество проб (N) в объеме недр, сопоставимом с годовой производительностью, коэффициент вариации содержаний (К вар, %). Результирующим показателем является относительная погрешность оценки средних содержаний ( $\Delta_{\text{факт}}$ , %).

Таблица 6.2 – Погрешности оценки для сетей разной плотности при производительности 5 млн т/год

№№	А, млн.т	$S_{\text{яч}}$ , м <sup>2</sup>	L, м	Об. мас.т/м <sup>3</sup>	$Q_{\text{проба}}$ , т	N	К вар, %	$\Delta_{\text{факт}}$ , %	примечание
1	5,0	300	0.75	2.8	630	7937	162	<b>1.82</b>	measured
2	5.0	2500	0.75	2.8	5250	952	162	<b>5.24</b>	indicated
3	5.0	4000	0.75	2.8	8400	595	162	<b>6.64</b>	indicated
4	5.0	5000	0.75	2.8	10500	476	162	<b>7.43</b>	indicated

При условии учета масштаба месторождения в полном объеме с позиций точности оценки средних содержаний на участке детализации, где средняя площадь разведочной ячейки составляет 300 м<sup>2</sup> (20×15м), могут быть выделены ресурсы категории measured. Возможность отнесения к данной категории не противоречит данным вариографии. Во всем остальном диапазоне проанализированных сетей по критерию точности ресурсы могут соответствовать категории indicated. По критерию ошибок геометризации для сетей с площадью ячейки от 4000 до 5000 м<sup>2</sup> категория ресурсов может быть снижена до inferred в связи с тем, что сеть является нерегулярной и неоптимальной с позиции учета анизотропии формы рудных тел ( $K_A = 2,5$ ). Таким образом, предлагаемый количественный подход в целом не противоречит классификации ресурсов, имеющейся в отчете, хотя уточняет ее в части выделения ресурсов категории measured.

В соответствии с требованиями Кодекса JORC ресурсы категории inferred должны быть исключены из геолого-экономического анализа. Сравнение подходов может быть рассмотрено и в этих условиях.

С позиции традиционной отечественной оценки снижение количества руды до 24 млн т не приводит к изменению группы сложности строения месторождения. Соответственно, не изменяются и выводы о рекомендуемых параметрах сети и категоричности запасов/ресурсов.

В рамках количественного подхода изменение запасов руды приводит к изменению производительности предприятия. При том же соотношении общего количества руды и руды в карьере, а также при сохранении уровня разубоживания проектную производительность можно принять равной 1.5 млн т/год. Результаты расчета погрешностей в этих условиях приведены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Погрешности оценки для сетей разной плотности при производительности

№№	А, млн т	S <sub>яч</sub> , м <sup>2</sup>	L, м	Об. масса т/м <sup>3</sup>	Q проба, т	N	К вар, %	Δ <sub>факт.</sub> %	Примечание
1	1,5	300	0,75	2,8	630	2381	162	<b>3,32</b>	measured
2	1,5	2200	0,75	2,8	4620	325	162	<b>9,00</b>	indicated
3	1,5	2500	0,75	2,8	5250	286	162	<b>9,59</b>	inferred
4	1,5	4000	0,75	2,8	8400	179	162	<b>12,1</b>	inferred

Для участка детализации сохраняется возможность квалификации ресурсов по категории measured. Квалификация ресурсов по категории indicated возможна на участках, где площади ячейки разведочной сети не превышает 2200 м<sup>2</sup>, в остальных случаях ресурсы будут квалифицироваться по категории inferred. Полученные результаты оценки категоричности ресурсов достаточно близки к установленной ранее, если не считать предложения дополнительно выделить ресурсы категории measured.

Таким образом, предлагаемый количественный подход к квалификации запасов в целом не противоречит практике их оценки в отечественных и зарубежных стандартах. Вместе с тем он позволяет более обоснованно определять категории запасов/ресурсов и их соотношения в различных ситуациях.

*К защите предлагается тезисное положение 4:*

***Квалификация запасов на количественной основе в подсчетных блоках золоторудных месторождений должна определяться точностью оценки средних содержаний по ним, вычисляемой исходя из уровня изменчивости с учетом случайной составляющей, и числа проб. Для сопоставления полученных значений с допустимой величиной критерия требуется внесение поправок, учитывающих различие в запасах блока с рудными объемами недр, сопоставимыми с годовой, полугодовой или квартальной производительностями предприятия.***

***Квалификация запасов по блокам корректируется с учетом величины ошибок геометризации, определяемых по характеристикам вариограмм индикаторов или другими методами.***

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка разведанности запасов на рудных месторождениях является инструментом регулирования необходимости и достаточности их изучения. На ее основе принимаются решения по инвестиционной привлекательности проектов и стоимостной оценке месторождений. Определение степени разведанности реализуется в категориях запасов или ресурсов, требования к которым установлены во всех современных классификациях. В свою очередь обоснование категории запасов требует изучения морфологии и изменчивости свойств объектов в сочетании с принятыми параметрами разведочной сети.

В настоящее время решение данной проблемы опирается преимущественно на качественные подходы, что не способствует корректности и объективности полученных выводов.

Представленная работа предлагает целостную концепцию оценки разведанности запасов на основе количественных показателей. Решение её задач опирается на выявление взаимосвязи свойств природных объектов с параметрами разведочной сети и показателями/критериями, определяющими возможность отнесения запасов/ресурсов по отдельным блокам и участкам к той или иной категории. Работы по данной тематике проведены на объектах, обладающих разным масштабом и относящихся к различным морфологическим типам. При выполнении исследований использованы современные методы и подходы, включая статистический и геостатистический анализ, а также положения фрактальной геометрии. Широко применялось сопоставление приемов и результатов изучения зарубежных объектов.

Совокупное влияние морфологических свойств и показателей изменчивости объектов отражается в группировке месторождений по сложности геологического строения [37], в основе применения которой лежит принцип аналогии. Классификация месторождений ТПИ, разработанная на этой основе, в течение длительного времени успешно используется для выбора методики изучения месторождений ТПИ. Вместе с тем условия отнесения объекта в той или иной группе определены не однозначно. Предлагаемые ранее для решения этой задачи [66] количественные показатели (коэффициент рудоносности, показатель сложности, коэффициенты вариации содержаний и мощности), как установлено проведенным анализом, являются несостоятельными.

Характеристика морфологии рудных тел традиционно рассматривается в качестве фактора, определяющего выбор методики изучения объекта и его геолого-экономической оценки. В действительности в классификациях описывается морфология объектов разных масштабных уровней, возможности выделения которых определяются детальностью изучения. В

число признаков, которые могут уверенно устанавливаться на ранних стадиях геологоразведочных работ, входят морфологический тип и масштаб оруденения. Количественными характеристиками морфологии рудных тел являются мощность и средние размеры по падению и простиранию; соотношение размеров определяет анизотропию объекта.

Проведенными исследованиями установлено, что основным показателем сложности морфологии объекта является фрактальная размерность или метрика Хаусдорфа (D). Исследования ее величины в 2-D пространстве были проведены на золоторудных месторождениях различных морфологических типов при наличии данных оконтуривания рудных тел по предельно плотной сети наблюдений. Результаты изучения показали, что фрактальная размерность рудных объектов изменяется в диапазоне от 1 до 1,6. Установлена связь метрики Хаусдорфа с морфологическим типом оруденения.

Масштаб месторождений предложено характеризовать через количество руды, сопоставимое с проектной или фактической производительностью предприятия. Использование такого показателя обусловлено практическими потребностями горного производства, а также задачами обоснования разведочной геометрии сети и квалификации запасов.

Ведущей характеристикой оруденения, на основе которой определяются остальные геологоразведочные параметры, служит содержание полезных компонентов. Выполненным анализом было установлено, что важным методологическим аспектом изучения изменчивости содержаний является ее оценка по пробам равной длины или по композитам. Этот подход почти не используется при представлении материалов ТЭО и подсчета запасов в ГКЗ Роснедра, что существенно ограничивает возможности обоснования сети и оценки разведанности запасов на количественной основе.

Применение формул математической статистики, с теоретических позиций, требует учета ряда ограничений, в том числе характера исходных данных и вида распределения. Проведенные исследования показали, что отмеченные факторы не оказывают влияния на оценку дисперсии средних значений признака в условиях выборок большого объема.

В рамках изучения изменчивости содержаний компонента рассмотрены подходы, основанные на анализе значений признака/содержаний как пространственной переменной. Они лежат в основе современных горно-геологических информационных систем (ГГИС) и представляются в виде вариограмм, которые используются далее при построении блочных моделей. Характеристики вариограмм, в том числе расстояния для разных уровней относительной дисперсии, зарубежными авторами часто предлагаются для классификации запасов/ресурсов. На основе изучения характеристик морфологии рудных образований и показателей изменчивости, а также условий их определения предлагаются новые принципы описания сложности геологического строения золоторудных месторождений. Они

ориентированы на учет масштаба объектов, их морфологический тип и фрактальную размерность, предусмотрено разделение объектов по степени изменчивости содержаний в пробах или композитах. Объектом оценки сложности строения может являться не только месторождение в целом, но и его участки, отличающиеся морфологией рудных образований, особенно в условиях их оконтуривания по разным кондиционным показателям.

Особенностью предложенного подхода является более детальная характеристика объектов, основанная на количественных показателях, определение которых доступно на начальных стадиях работ.

Существующие методы обоснования параметров разведочной сети опираются на качественные и количественные подходы. Последние используют эмпирические и аналитические способы определения значений показателей, позволяющих отнести запасы к той или иной категории. На основании анализа литературных источников, различных классификаций и обобщения опыта работы ГКЗ по утверждению запасов установлено, что в качестве основных таких показателей или критериев разведанности используются: точность оценки запасов и ошибки геометризации.

Сложности их практического применения заключаются в отсутствии общепринятых значений критериев для запасов разных категорий, а также неоднозначность выбора рудных объемов недр, для которых они устанавливаются. Дополнительным осложняющим фактором является неопределенность способов оценки критериев в различных условиях изученности.

На основе проведенных исследований разработаны оригинальные процедуры определения параметров разведочной сети для установленных значений критериев. При расчетах учитываются свойства объектов, выявленные для разных условий оконтуривания оруденения.

Аналитический расчет параметров разведочной сети с позиций точности оценки среднего содержания компонента базируется на следующих основных положениях:

- изменчивость содержаний или метрограммов оценивается для рудных тел, оконтуренных по установленным кондиционным показателям, дисперсия и коэффициент вариации определяются по пробам равной длины или по композитам;
- погрешность оценки геологоразведочных параметров относится к объемам недр, сопоставимым с годовой или квартальной (категория В) производительностью предприятия.

Проведенный на ряде месторождений анализ характеристик изменчивости, в том числе с использованием вариографии, позволил прийти к выводу, что расчет погрешности средних значений содержаний для запасов категории  $C_1$  может проводиться по «случайной» схеме, то есть по известным формулам математической статистики, без учета вида распределения и влияния закономерной компоненты.

С учетом изложенных принципов внесены коррективы в приемы обоснования разведочной сети методом разрежения и интерпретацию его результатов.

Для оценки ошибок геометризации (ОГ), особенно на ранних стадиях геологоразведочных работ, предложены подходы, основанные на использовании фрактальной размерности  $D$ . В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований установлена зависимость «истинных» размеров рудных тел от их размеров, выявленных по разведочным данным при определенном шаге сети, на основе учета метрики Хаусдорфа.

Это дает возможность оценивать величину ошибок геометризации при данном шаге сети по обоснованным автором аналитическим выражениям. Предложенный прием не требует наличия участков детализации на изучаемом объекте.

Другой прием оценки ошибок геометризации, основанный на принципах фрактальной геометрии, предполагает определение ширины «искажающей площадки» через величину коэффициента удлинения, который в свою очередь связан с размерностью  $D$ . Данный подход также позволяет вычислять величину ошибок геометризации без наличия участков детализации, однако он является менее корректным.

Для изучения взаимосвязи величины ошибок геометризации с характеристиками изменчивости проведены исследования вариограмм при разных условиях оконтуривания оруденения. Установлено, что пределы корреляции (range) вариограмм индикатора характеризуют средние размеры рудных образований при разных значениях бортовых содержаний, что также дает возможность определять значения ошибок геометризации аналитическим путем.

Следует подчеркнуть, что получение необходимой информации для расчетов сети по предложенным процедурам возможно уже на ранних стадиях геологоразведочных работ.

Предельные или допустимые значения критериев разведанности являются обязательным условием обоснования геометрии разведочной сети и квалификации запасов по различным категориям. Эти значения до настоящего времени однозначно не установлены, хотя они неоднократно предлагались в исследованиях и публикациях. Не определены они ни в нормативно-методических документах ГКЗ, ни в требованиях зарубежных стандартов отчетности.

С целью обоснования допустимых значений критериев разведанности были проведены исследования по определению их фактических величин на уже изученных месторождениях, запасы которых прошли апробацию в ГКЗ. Анализ данных на примерах отечественных объектов разных морфологических типов и масштабов выполнен применительно к запасам категории  $C_1$ , которую можно рассматривать как базовую относительно других категорий. Предварительно

было оценено влияние пространственной компоненты изменчивости на возможности расчетов по предложенной схеме.

Было установлено, что погрешности оценки средних содержаний золота для крупных и средних по масштабу месторождений изменяются в пределах 6,0 % - 13 % и составляют в среднем 9,7 %. Для месторождений среднего масштаба они находятся в пределах 4,6 % - 23,1 % и в среднем составляют 10,8 %. Для мелких по масштабу месторождений фактические погрешности изменяются в пределах 5,0 % - 32,8 %, в среднем они составляют 18,3 %. Таким образом, выявлена тенденция увеличения фактических погрешностей оценки содержаний от крупных и уникальных месторождений к мелким.

Аналогичные исследования проведены по материалам публичной отчетности для зарубежных месторождений золота и урана. Точность оценки анализировалась применительно к ресурсам категории *indicated*, наиболее близко соответствующей отечественной категории запасов  $C_1$ . Полученные результаты сопоставимы по значениям критерия с данными для отечественных месторождений.

С целью определения допустимых значений ошибок геометризации анализ их величины был проведен для ряда отечественных месторождений и участков, изученных по категории  $C_1$ . Определения ОГ выполнены эмпирическим способом по подробно изученным планам эксплуатационных горных работ и детализационным разрезам. Результаты измерений показали для запасов, разведанных по категории  $C_1$ , величина ОГ изменяется в пределах 8,1 % - 42,5 %, что в целом соответствует предложениям о допустимой величине этого критерия (20 % - 50 %) для других типов рудных месторождений. Для проекций рудных тел можно принять, что допустимая величина ОГ не превышает 30 %.

В зарубежной практике квалификации запасов понятие «ошибки геометризации» не рассматривается. Вместе с тем определение категории запасов/ресурсов предусматривает анализ вариограмм, в соответствии с которым возможности квалификации ресурсов категории *indicated* ограничивается шагом сети, соизмеримым с пороговым расстоянием. Из этого положения следует, что допустимая величина ошибок геометризации для ресурсов этой категории от 20 % до 25 %. Для ресурсов категории *measured* допустимые пределы этих ошибок могут составлять от 10 % до 20 %.

Требования к допустимым значениям критериев были рассмотрены с позиций экономических рисков освоения месторождений. Вероятность убытков при отработке месторождения за определенный период, например, за год, определяется уровнем превышения среднего содержания компонента над минимальным промышленным содержанием и погрешностью определения этого параметра в БГП при данной плотности разведочной сети. При

низкой точности оценки параметра величина рисков может оказаться достаточно высокой. Их снижение достигается повышением разведанности, то есть сгущением сети наблюдений.

В работе представлена типизация золоторудных объектов, позволяющая осуществлять выбор параметров разведочной сети категории  $C_1$  на разных стадиях разведочных работ. Её разработка опирается на изложенные принципы группировки золоторудных месторождений по сложности строения и установленные допустимые значения критериев разведанности.

Типизация ориентирована на оценку параметров сети с позиций точности оценки средних содержаний. Достаточность сети с позиций ошибок геометризации оценивается дополнительными расчетами с использованием положений фрактальной геометрии или геостатистического анализа.

Квалификация запасов осуществляется по данным геологоразведочных работ, когда появляется новая информация, позволяющая учитывать конкретные условия изучения объекта на локальных участках недр. В отечественной практике изучения месторождений она проводится по подсчетным блокам, имеющим разные размеры, свойства оруденения и параметры фактической разведочной сети в их пределах.

В настоящее время используются, главным образом, качественные подходы, базирующиеся на опыте специалистов и экспертов. Различие условий оценки предопределяет неоднозначность квалификации запасов в конкретных ситуациях.

Для объективного решения этой задачи предлагаются количественные подходы, основанные на изучении изменчивости содержаний и характеристиках разведочной сети по блокам. Рассчитанные значения погрешности оценки средних содержаний в блоках следует корректировать с учетом соотношения запасов блока и количества руды в БГП. Полученные значения сравниваются с допустимыми величинами, на основе чего делается предварительный вывод об их категоричности.

Принадлежность к категории уточняется на основе оценки ошибок геометризации. Они могут быть определены по вариограммам индикатора, построенным по домену, включающему подсчетные блоки, или с помощью других приемов, в том числе использующих фрактальные характеристики объекта.



### Список сокращений

- БГП – блок/объем недр, сопоставимый по запасам руды с годовой производительностью предприятия;
- БВР – буровзрывные работы;
- БМ – блочная модель/ блочное моделирование;
- ГКЗ – Государственная комиссия по запасам;
- ГРР – геологоразведочные работы;
- ДСО – допустимое относительное стандартное отклонение;
- МПИ - месторождения полезных ископаемых;
- МР – методические рекомендации;
- ОГ – ошибка геометризации;
- ОГР- открытые горные работы;
- ОЭР – опережающая эксплуатационная разведка;
- ППР – подземные горные работы;
- ПЗ - подсчет запасов месторождения;
- ПК – полезный компонент;
- РК ООН – рамочная классификация запасов месторождений полезных ископаемых Организации Объединенных Наций;
- СЭР – сопровождающая эксплуатационная разведка;
- ТПИ – твердые полезные ископаемые;
- ТЭО – технико-экономическое обоснование кондиций;
- JORC - Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves – Австралийский Кодекс для Отчетности о результатах разведки, минеральных ресурсах и рудных запасах;
- CRIRSCO - Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards –Комитет для минеральных ресурсов международных стандартов отчетности.

### Список литературы

1. Александрова А.Е. Методы классификации запасов за рубежом / А.Е. Александрова, Д.А. Куликов // Недропользование XXI век. – 2019. – №2. – С. 34-41.
2. Бирюков В.И. Рациональная сеть предварительной разведки. Методическое пособие / В.И. Бирюков, М.Н. Денисов, Е.К. Казаков, С.Н. Куличихин, В.К. Павлов, Н.И. Поздняков. – Москва: Недра, 1978. – 262 с.
3. Богацкий В.В. Математический анализ разведочной сети. / В.В. Богацкий. – Москва: Госгеолтехиздат, 1963. – 212 с.
4. Будрик В.Г. Применение методов геостатистики и горно-геологических информационных технологий при госэкспертизе запасов рудных месторождений: проблемы и решения / В.Г. Будрик, О.И. Гуськов, А.И. Ежов, П.П. Кушнарёв, В.Ю. Маркевич // Недропользование XXI век. – 2010. – № 1. – С. 37-43.
5. Васильев И.С. Курс методики разведочного дела / И.С. Васильев, Н.В. Барышев. – Москва-Ленинград-Новосибирск: ОНТИ-НКТП-СССР, 1933. – 544 с.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – Москва: Наука, 1969. – 576 с.
7. Викентьев В.А. Анизотропия строения и оптимальная форма разведочной сети / В.А. Викентьев, В.А. Воронцов, П.И. Кушнарёв, П.П. Ясковский // Известия ВУЗов, серия Геология и разведка. – 1981. – № 11. – С. 79-92.
8. Викентьев В.А. О свойствах ошибок геометризации / В.А. Викентьев, В.А. Воронцов, П.И. Кушнарёв, П.П. Ясковский // Известия ВУЗов, серия Геология и разведка. – 1979. – № 2. – С. 96-107.
9. Викентьев В.А. Оконтуривание прерывистого орудинения при подсчете запасов месторождений / В.А. Викентьев, В.А. Воронцов, П.И. Кушнарёв, П.П. Ясковский // Известия ВУЗов, серия Геология и разведка. – 1982. – № 7. – С. 76-88.
10. Викентьев В.А. Оценка степени разведанности запасов прерывистого орудинения (статья 1) / В.А. Викентьев, В.А. Воронцов, П.И. Кушнарёв, П.П. Ясковский // Известия ВУЗов, серия Геология и разведка. – 1981. – № 6. – С. 91-103.
11. Викентьев В.А. Оценка степени разведанности запасов прерывистого орудинения (статья 2) / В.А. Викентьев, В.А. Воронцов, П.И. Кушнарёв, П.П. Ясковский // Известия ВУЗов, серия Геология и разведка. – 1981. – № 10. – С. 88-99.
12. Викентьев В.А. Экспертиза подсчета запасов рудных месторождений / В.А. Викентьев, И.А. Карпенко, М.В. Шумилин. – Москва: Недра, 1988. – 199 с.
13. Викентьев, В.А. О главных факторах, определяющих степень разведанности запасов месторождений твёрдых полезных ископаемых / В.А. Викентьев, П.И. Кушнарёв // Известия ВУЗов, серия Геология и разведка. – 1978. – № 6. – С. 80-85.

14. Волярович Г.П., Иванов В.Н. (ред.). Методика разведки золоторудных месторождений / В.Н. Иванов, В.П. Кувшинов, В.И. Батрак, В.И. Лобач, М.Ю. Катанский, Б.В. Рогачев, В.В. Стефанович, А.Г. Волярович, Н.П. Варгунина, А.П. Селезнев, Б.И. Беневольский, Р.А. Амосов, В.А. Нарсеев, В.И. Сладков, Г.В. Седельникова. – Москва: ЦНИГРИ, 1991. – 343 с.
15. Ворожбенко В.Д. Оценка влияния литологических и структурных факторов на распределение золота в рудах Наталкинского золоторудного месторождения / В.Д. Ворожбенко, С.А. Григорьев, П.И. Кушнарев, А.П. Кушнарев, В.Ю. Маркевич, В.Н. Токарев // Руды и металлы. – 2006. – № 3. – С. 45-59.
16. Воропаев В.И. Блочное моделирование и проблемы использования его результатов в работе ФГУ ГКЗ / В.И. Воропаев, П.И. Кушнарев // Недропользование XXI век. – 2006. – №1. – С. 75-77.
17. Горяинов П. М. Самоорганизация минеральных систем / П. М. Горяинов, Г.Ю. Иванюк. – Москва: ГЕОС, 2001. – 311 с.
18. Градовский И.И. Приемы блочного моделирования золоторудных месторождений при разработке ТЭО / Градовский И.И., Кушнарев П.И. // Недропользование XXI век. – 2014. – № 1. – С. 66-70.
19. Григоров С.А. Наталкинское золоторудное месторождение – строение и основные поисковые признаки / С.А. Григоров, В.Д. Ворожбенко, П.И. Кушнарев, В.Ю. Маркевич, В.Н. Токарев, В.И. Чичев, Н.П. Ягубов, Б.К. Михайлов // Отечественная геология. – Москва. – 2007 г. . – № 3. – С.43-50.
20. Григоров С.А. Основные черты геологического строения и локализации оруденения золоторудного месторождения Павлик / С.А. Григоров, П.П. Кушнарев // Разведка и охрана недр. – 2019. – № 9. – С. 3-8.
21. Григоров С.А. Кушнарев П.И. Геохимическая разведка / С.А. Григоров, П.И. Кушнарев // Недропользование XXI век. – 2010. – № 5. – С. 26-33.
22. Гуськов О.И. О применении статистических методов для анализа плотности разведочной сети / О.И. Гуськов, М.В. Шумилин // Известия ВУЗов, серия Геология и разведка. – 1968. – № 6. – С. 69-77.
23. Давид М. Геостатистические методы при оценке запасов руд / М. Давид. – Ленинград: Недра, 1980. – 360 с.
24. Ершов В.В. Основы горно-промышленной геологии / В.В. Ершов – Москва: Недра, 1988. – 326 с.
25. Жидков С.Н. Об использовании компьютерного моделирования при подсчете запасов / С.Н. Жидков, Т.О. Бабина, П.И. Кушнарев, Н.С. Маркова // Недропользование XXI век. – 2007. – № 6. – С. 30-33.

26. Зенков Д.А. О точности разведочных разрезов / Д.А. Зенков // Советская геология. – 1955. – № 41. – С. 146-165.
27. Иванов С.Н. Новая классификация запасов и прогнозных ресурсов ТПИ и положение о стадийности ГРР: проблемы, связанные с введением в действие / С.Н. Иванов, Т.Е. Анненкова, О.В. Казанов, П.И. Кушнарев // Недропользование XXI век. – 2018. – №2. – С. 106-110.
28. Иванов С.Н. Оценка разведанности запасов твердых полезных ископаемых / С.Н. Иванов, П.И. Кушнарев // Недропользование XXI век. – 2019. – № 2. – С. 82-91.
29. Иудин Д.И. Фракталы: от простого к сложному / Д.И. Иудин, Е.В. Колосов. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2012. – 200 с.
30. Каждан А.Б. Методические основы количественной оценки разведанности запасов твердых полезных ископаемых / А.Б. Каждан, М.В. Шумилин, В.А. Викентьев // Советская геология. – 1974. – № 11. – С. 7-19.
31. Каждан А.Б. Методологические основы разведки полезных ископаемых / А.Б. Каждан. – Москва: Недра, 1974. – 272 с.
32. Каждан А.Б. Разведка месторождений полезных ископаемых / А.Б. Каждан. – Москва: Недра, 1977. – 327 с.
33. Каждан А.Б. Требования к разведанности и категоризации запасов / А.Б. Каждан, М.В. Шумилин // Советская геология. – 1976. – №5. – С. 92-102.
34. Каллистов П.Л. Изменчивость оруденения и плотность наблюдений при разведке и опробовании / П.Л. Каллистов // Советская геология. – 1956. – № 53. – С.118-151.
35. Капутин Ю.Е. Система контроля содержаний на горных предприятиях / Ю.Е. Капутин. – Санкт-Петербург: Недра, 2012. – 302 с.
36. Кащеев Л.П. О выборе разведочной сети при разведке прибрежно-морских россыпных месторождений / Кащеев Л.П., Кушнарев П.И. // Известия ВУЗов, серия Геология и разведка. – 1975. – № 3. – С. 115-119.
37. Классификация запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых: [Утверждена Приказом МПР России от 11.12.2006 № 278]. – Москва: МПР, 2006. – 6 с.
38. Коган И.Д. Подсчет запасов и геолого-промышленная оценка рудных месторождений / И.Д. Коган. – Москва: Недра. – 1974. – 304 с.
39. Константинов М.М. Золоторудные провинции мира / М.М. Константинов. – Москва: Научный мир, 2006. – 358 с.
40. Коткин В.А. Количественная оценка точности и достоверности разведанных запасов месторождений твердых полезных ископаемых / В.А. Коткин, А.В. Мельникова, А.Н. Лазарев, Н.Н. Лагонский // Недропользование XXI век. – 2009. – №1. – С. 29-33.

41. Крамбейн У. Статистические модели в геологии / Крамбейн У. Грейбилл Ф. – Москва: МИР, 1969. – 397 с.
42. Крейтер В.М. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых / В.М. Крейтер. – Москва: Недра, 1969. – 384 с.
43. Крейтер В.М. Теоретические основы поиска и разведки твердых полезных ископаемых / В.М. Крейтер. – Москва: Недра, 1968. – 432 с.
44. Кривцов А.И. Системы оценки и разведки золоторудных месторождений на основе многофакторных моделей. / А.И. Кривцов, С.Н. Жидков, М.Ю. Катанский и др. – Москва: ЦНИГРИ, 2002. – 121 с.
45. Кузьмин В.И. Геометризация и подсчет запасов месторождений твердых полезных ископаемых / В.И. Кузьмин. – Москва: Недра 1987. – 242 с.
46. Кушнарев П.И. Анализ погрешности оценки запасов золоторудных месторождений / П.И. Кушнарев // Разведка и охрана недр. – 2021. – № 4. – С. 49-55.
47. Кушнарев П.И. Анализ прирезок при повариантном подсчете запасов золоторудного месторождения / П.И. Кушнарев // Золото и технологии. – 2019. – № 4. – С.76-80.
48. Кушнарев П.И. Анализ причин ошибок в оконтуривании рудных залежей и тел золоторудных месторождений / П.И. Кушнарев // Золото и технологии. – 2012. – №2. – С. 69-77.
49. Кушнарев П.И. Вопросы сопоставления результатов подсчета запасов традиционным методом с данными блочного моделирования (на примере золоторудных месторождений Куранахского рудного поля) / П.И. Кушнарев, Н.Н. Демченко // Недропользование XXI век. – 2016. – № 5. – С. 114-123.
50. Кушнарев П.И. Геологический анализ кондиций при разработке ТЭО / П.И. Кушнарев // Геология и охрана недр. – 2012. – № 2. – С. 39-43.
51. Кушнарев П.И. Интерпретация результатов разрежения разведочной сети / П.И. Кушнарев // Золото и технологии. – 2013. – №1. – С. 82-88.
52. Кушнарев П.И. Методическое обеспечение условий блочного моделирования в стандартах ГКЗ РФ / П.И. Кушнарев // Геология и охрана недр. – 2015. – № 4. – С. 47-55.
53. Кушнарев П.И. Обоснование геометрии разведочной сети и квалификация запасов (на примере золоторудных месторождений) / П.И. Кушнарев // Недропользование XXI век. – 2019. – №5. – С. 34-45.
54. Кушнарев П.И. Обоснование рационального объема проб при разведке россыпных месторождений / П.И. Кушнарев // Известия ВУЗов, серия Геология и разведка. – 1984. – №9. – С. 72-77.

55. Кушнарев П.И. Объекты оценки сложности геологического строения месторождений твердых полезных ископаемых / Кушнарев П.И., Лазарев А.Б. // Разведка и охрана недр. – 2021. – № 9. – С. 8-10.
56. Кушнарев П.И. Опыт применения интервальных оценок для характеристики среднего содержания на примере одного из месторождений / П.И. Кушнарев, Е.А. Сидорков // Известия ВУЗов, серия Геология и разведка. – 1967. – № 4. – С. 68-72.
57. Кушнарев П.И. Оценка представительности опробования / П.И. Кушнарев // Геология и охрана недр. – 2014. – №3. – С. 61-66.
58. Кушнарев П.И. Применение методов фрактальной геометрии для оценки потерь и разубоживания при разработке месторождений сложного строения / Кушнарев П.И., Сытенков В.Н., Чичерина А.Г. // Рациональное освоение недр. – 2020. – № 5. – С. 64-71.
59. Кушнарев П.И. Скрытые потери и разубоживание / П.И. Кушнарев // Золото и технологии. – 2017. – №3. – С. 82-87.
60. Кушнарев П.И. Современные способы подсчета запасов и геолого-экономической оценки месторождений твердых полезных ископаемых / П.И. Кушнарев // Разведка и охрана недр. – 2018. – № 2. – С. 60-66.
61. Кушнарев П.И. Фрактальная геометрия при решении задач разведки и оценки месторождений твердых полезных ископаемых / Кушнарев П.И., Иванов С.Н. // Разведка и охрана недр. – 2021. – № 7. – С. 38-45.
62. Мальцев В.А. Оценка анизотропии различными интерполяторами при блочном моделировании месторождений / В.А. Мальцев // Недропользование XXI век. – 2010. – № 3. – С. 54-61.
63. Мандельброт Б.Б. Фрактальная геометрия природы / Б.Б. Мандельброт. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных технологий, 2002. – 656 с.
64. Мартыненко В.Г. Основные черты геологического строения Вернинского золоторудного месторождения / В.Г. Мартыненко, А.В. Домашов, С.Ю. Дейс, А.Г. Корзаков, П.И. Кушнарев // Разведка и охрана недр. – 2017. – № 4. – С. 3-8.
65. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики / Ж. Матерон. – Москва: Мир, 1968. – 408 с.
66. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Золото рудное. [Утверждены распоряжением МПР России от 05.06.2007. №37-р.]. – Москва: ГКЗ, 2007. – 68 с.
67. Методические рекомендации по сопоставлению данных разведки и разработки месторождений твердых полезных ископаемых. [Утверждены распоряжением МПР России от 03.04.2007. №11-17/0044]. – Москва: ГКЗ, 2007. – 30 с.

68. Методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию кондиций для запасов твердых полезных ископаемых (кроме углей и горючих сланцев). [Утверждена распоряжением МПР России от 05.06.2007. №37-р.]. – Москва: ГКЗ, 2007. – 49 с.

69. Методические указания по нормированию, определению и учету потерь и разубоживания золотосодержащей руды (песков) при добыче. [Утверждены распоряжением Роскомдрагмет 21.12.1993. №11-17/0044] – ОАО Иргиредмет, Иркутск, 1994. – 265 с.

70. Пащенко В.З. Математические основы разведки недр / В.З. Пащенко. – Москва: Высшая школа, 1995. – 111 с.

71. Петров В.А. О выборе сетей для разведки рудных объектов / В.А. Петров // Советская геология. – 1975. – №11. – С. 104-115.

72. Подсчет запасов твердых полезных ископаемых. Инструкция к классификации запасов твердых полезных ископаемых [Главное геологоразведочное управление ВСНХ СССР]. – Москва-Ленинград: Геологическое издательство Главного геологоразведочного управления, 1931. – 66 с.

73. Прокофьев А.П. Практические методы подсчета запасов рудных месторождений / А.П. Прокофьев // Москва: Государственное издательство геологической литературы, 1958. – 136 с.

74. Рац М.В. Неоднородность горных пород и их физических свойств / М.В. Рац. – Москва: Наука, 1968. – 108 с.

75. Рекомендации к составу и правилам оформления представляемых на государственную экспертизу материалов по технико-экономическому обоснованию кондиций и подсчету запасов твердых полезных ископаемых с использованием блочного моделирования на месторождениях различного морфологического типа [рекомендованы к использованию протоколом МПР от 10.02.15 №6]. – Москва: ГКЗ, 2015. – 76 с.

76. Родионов Д.А. Справочник по математическим методам в геологии / Д.А. Родионов, Р.И. Коган, Е.В. Голубева, Б.И. Смирнов, С.В. Сиротинская. – Москва: Недра, 1987. – 336 с.

77. Родионов Д.А. Статистические решения в геологии / Д.А. Родионов. – Москва: Недра, 1981. – 231 с.

78. Рудаков В.В. Наталкинское золоторудное месторождение в новом формате / В.В. Рудаков, М.П. Казимиров, С.А. Григоров, В.И. Кобец, П.И. Кушнарев, В.Ю. Маркевич, Б.К. Михайлов, Н.П. Ягубов // Драгоценные металлы драгоценные камни. – 2005. – № 10. – С. 113.

79. Саганюк В.Б. Разработка проекта новой «Классификации запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых» / В.Б. Саганюк, В.В. Шкиль // Недропользование XXI век. – 2014. – № 6. – С. 60-63.

80. Семенов К.Л. Морфология тел полезных ископаемых / К.Л. Семенов. – Москва: Недра, 1985. – 118 с.

81. Смирнов В.И. О плотности разведочной сети / В.И. Смирнов // Советская геология. – 1957. – № 58. – С.150-162.
82. Смирнов В.И. Подсчет запасов месторождений полезных ископаемых / В.И. Смирнов, А.П. Прокофьев, В.М. Борзунов, А.И. Дюков, М.А. Жданов, А.И. Любимов, В.Е. Некипелов, Н.А. Плотников. – Москва: Госгеолтехиздат, 1960. – 672 с.
83. Усиков Ю.Т. Достоверность геологической разведочной информации / Ю.Т. Усиков. – Москва: Недра, 1988. – 120 с.
84. Хилл Дж. Х. Геолого-экономическая оценка горнорудных проектов. Вводный курс / Дж. Х. Хилл. – Москва: ЦНИГРИ-МГУ, 1993. – 136 с.
85. Четвериков Л.И. Теоретические основы разведки недр / Л.И. Четвериков. – Москва: Недра, 1984. – 160 с.
86. Шаклеин С.В. Количественная оценка достоверности геологических материалов угольных месторождений / С.В. Шаклеин. – Кемерово, Кузбассвуиздат, 2005. – 243 с.
87. Шаклеин С.В. Оценка риска пользования недрами: учебное пособие / С.В. Шаклеин, Т.Б. Рогова. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2009. – 120с.
88. Шарапов И.П. Применение математической статистики в геологии (Статистический анализ геологических данных) / И.П. Шарапов. – Москва: Недра, 1971. – 248 с.
89. Шпуров И.В. Классификация запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых – новый шаг в развитии недропользования. / Шпуров И.В., Шкиль В.В., Лазарев А.В., Саганюк В.Б. // Недропользование XXI век. – 2018. – № 2. – С. 96-106.
90. Шумилин М.В. Бизнес в ресурсодобывающих отраслях: Справочник / М.В. Шумилин, В.А. Алискеров, М.Н. Денисов, В.Л. Заверткин – Москва: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001– 268 с.
91. Шумилин М.В. Подсчет запасов урановых месторождений / М.В. Шумилин, В.А. Викентьев. – Москва: Недра, 1982. – 206 с.
92. Шумилин М.В. Геолого-экономические основы горного бизнеса / М.В. Шумилин. – Москва: ВИМС, 1998. – 168 с.
93. Ясковский П.П. Десять портретов в одной рамке: очерки о российских геологоразведчиках / П.П. Ясковский. – Москва: ВИМС, 2015. – 144 с.
94. Ясковский П.П. Количественная оценка сложности строения рудных месторождений в плоских сечениях при разведке месторождений / П.П. Ясковский // Известия ВУЗов, Геология и разведка. – 1994. – №1. – С. – 76-83.
95. Abzalov M. Applied Mining Geology / M. Abzalov. – Cham (Switzerland): Springer International Publishing AG, 2016. – 448 p.



96. Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (The JORC Code). Prepared by the Joint Ore Reserves Committee of The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists and Minerals Council of Australia (JORC). Comparison JORC (2004) to JORC (2012) Draft Code. – 2012. – 98 p.

97. Coombs Jacqui. The Art and Science of Resource Estimation / J. Coombs. – Pert (Australia): Coombes capability, 2008. – 232 p.

98. Glacken I. Overview – mineral resource estimation / I. Glacken, A. Trueman // Mineral Resource and Ore Reserve Estimation. The AusIMM Guide to Good Practice. – 2014. – pp 263-276. (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

99. Parker H. Quantitative Criteria for mineral resource Classification / H. Parker – Joint State Commission on Mineral Resources of the Russian Federation (GKZ) and CRIRSCO Seminar «Russia and International Mineral Reserves/Resources Standards». – Moscow, Russian Federation. – 27 September 2010.

100. Schofield N.A. Determining Optimal Drilling Densities for Near Mine Resources, in Application of Computers in the Mining industry / Schofield N.A. – Wollongong, 1993. – pp. 34-41. – Revised and republished in this volume as: Schofield N.A. Determining Optimal Drilling Densities for Near Mine Resources, in Mineral Resource and Ore Reserve Estimation / Schofield N.A. – The AusIMM Guide to Good Practice (Ed: A C Edwards) . – The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne / Schofield N.A. – pp. 293-298.

#### **Публичные отчеты компаний**

101. Amended and Restated National Instrument 43-101 Preliminary economic assessment for the pine grove project, Lyon county, Nevada. P.A. Maloney, D.W. Willis, R.K. Martin, J.D. Welsh, T.Seal. – prepared for Lincoln Mining Corporation. – 2015. – p. 234.

102. An independent technical report on the Nalunaq Gold Project, South Greenland. – and the technical report prepared by SRK dated effective. – 2017.

103. An Updated Integrated Development Plan for the Madaouela Project, Niger. Prepared for GoviEx Niger Holding Limited. – 2015. – p. 660.

104. Ana Paula Project Preliminary Economic Assessment, Municipalities of Cuetzala del Progreso and Apaxtla del Castregon. Guerrero State, Mexico. – Prepared for: Timmins Gold Corp. – 2016. – p. 259.

105. Asanko Gold Mine. Definitive Feasibility Study. National instrument 43-101 Technical Report. Prepared by DRA Projects (Pty) Limited on behalf of Asanko Gold Inc. – 2017. – p 685.

106. Feasibility Study on Volta Grande Project / D. Chubb, A. Cleugh, J.-F. Couture, P. Franca, S. Gueorguiev, O. Leuangthong, A. Luz, G. Wahl, L. Weierhäuser, G. Zurowski – Pará, Brazil. – NI 43-101 Technical Report. – Prepared for: Belo Sun Mining Corp. 2015. – p. 484.

107. Independent Technical Report of Songjiagou Gold Project. – Shandong Province, the People's Republic of China. – Prepared for Majestic Gold Corp. – 2016. – p.183.
108. Mineral resources and ore reserves of the Natalka gold deposit. 2007. – Micon International Co Limited. – 2007. – p. 126.
109. National Instrument 43-101 Preliminary Assessment Powertech Uranium Corp. Centennial Uranium Project Weld County, Colorado. – Prepared for Powertech Uranium Corp. – 2010. – p. 162.
110. National Instrument 43-101 Preliminary economic assessment update (revised), Coles hill uranium property Pittsylvania county, Virginia United States of America. Pittsilvania county, Virginia, USA. – Prepared for Virginia Uranium Holding Inc. – 2013. – p. 126.
111. National Instrument 43-101 Technical Report – Initial mineral resource estimate for the Ivana uranium-vanadium deposit, Amarillo Grande Projec, Rio Negro Province, Argentina. – Prepared for Blue Sky Uranium Corp. – 2018. – p. 120.
112. National Instrument 43-101 Technical report on a feasibility study of the Wassa open pit mine and underground project in Ghana / M. Beare, R. Redden, N. Marshall, C. Bray, P. Riley. – Prepared for: Golden Star Resources Ltd. – 2014. – p.323.
113. National Instrument 43-101 Technical report on a preliminary economic assessment of the Mutanga uranium project in Zambia. – Prepared for GoviEx Uranium Inc. – 2017. – p. 263.
114. National Instrument 43-101 Technical Report on Mineral Resources: Juan Tafoya Uranium Project, Cibola, McKinley, and Sandoval Counties, New Mexico, USA. – Report prepared for Uranium Resources Inc. – 2014. – p. 75.
115. National Instrument 43-101 Technical Report on Resources Cebolleta Uranium Project Cibola County, New Mexico, USA. – Report prepared for Uranium Resources Inc. – 2014. – p. 142.
116. National Instrument 43-101 Technical report on resources Clarence stream gold project Charlotte county, New Brunswick, Canada. – Galway Metals Inc. – 2017. – p. 138.
117. National Instrument 43-101 Technical report on resources uranium energy corp. Palangana isr uranium project, Deposits PA-1, PA-2 and adjacent exploration areas Duval county, Texas. – Prepared for Uranium Energy Corp. – 2010. – p. 106.
118. National Instrument 43-101 Technical report On the Koster dam project. Clinton mining division, B.C. With recommendations for continuing exploration. – Prepared for: Mincord Exploration Consultants Ltd. – 2016. – p. 24.
119. National Instrument 43-101 Technical Report Preliminary Economic Assessment of the Madsen Gold Project for Pure Gold Mining Inc. Red Lake Area, Ontario, Canada. – Nordmin Engineering Ltd. – 2017. – p. 245.
120. National Instrument 43-101 Technical report resource update Beaton Creek gold project Pilbara region, Australia. – Prepared for NOVO Resources Corp. – 2018. – p.177.

121. National Instrument 43-101 Technical Report. DASA Uranium Project, Mineral Resource Update, Central Niger. For Global Atomic Corporation. – 2018. – p.128.
122. National Instrument 43-101 Technical Report. Exploration Target Range for the Castelo de Sonhos Gold Project, Para State-Brazil. – Prepared for Tristar Gold Inc. – 2016. – p. 52.
123. National Instrument 43-101. Technical report for the Burke hollow uranium project. Bee County, Texas, USA. – Technical Report prepared for Uranium Energy Corp. – 2013. – p. 90.
124. National Instrument 43-101. Technical report on the Namdini gold project, Ghana, West Africa – Cardinal resources limited. – 2017. – p. 188.
125. National Instrument 43-101. Technical report on the preliminary economic assessment of the arrow deposit, rook i property, province of Saskatchewan, Canada. – Technical Report. Prepared for nexgen energy Ltd. – 2017. – p. 274.
126. National Instrument 43-101. Technical report on the Anderson Uranium Project, Yavapai County, Arizona, USA. – Prepared for Uranium Energy Corp. – 2012. – p. 107.
127. National Instrument 43-101. Technical report on the Falea uranium, silver and copper deposit, Mali, West Africa. – Report prepared for Denison Mines Corp. – 2015. – p. 105.
128. Technical report and pre-feasibility study for the hollister underground mine. Elko county, Nevada. – Prepared for: Klondex Mines Ltd. – 2017. – p. 237.
129. Technical Report and Preliminary Economic Assessment for the Tiger Deposit, Rackla Gold Project, Yukon, Canada. – ATAC Resources Ltd. – 2016. – p.239.
130. Technical report for the hope brook gold project, Newfoundland and Labrador, Canada. 2015 Mineral resource estimate. Prepared by Mercator geological services limited. – 2015. – p.239.
131. Technical Report NI 43-101 for the Cariboo gold project and mineral resource estimate on the barkerville Mountain Deposit. – Barkerville Gold Mines Ltd. – 2017. – p. 250.
132. Technical report on Resources NI 43-101 Cajueiro project, States of Mato Grosso and Para, Brazil. – Prepared for Equitas Resources Corp. – 2016.
133. Technical report on the CHICO PROPERTY, Northern Saskatchewan, Canada National Instrument 43-101. – Prepared for: Cypress Geoservices Limited. – 2016.
134. Technical Report on the Pilar gold project, Suaqui Grande, Sonora, Mexico. – Prepared for: Colibri Resources Corporation. – 2017. – p. 83.
135. Technical report on the Roça Grande and Pilar operations, minas Gerais state, Brazil. – Prepared for: Jaguar Mining Inc. – 2016. – p. 193.
136. Technical report on the updated mineral resource estimate for the Bomboré gold project, Burkina Faso, West Africa. NI 43-101. – Report prepared for Orezone gold corporation. – 2017. – p. 224.

137. Technical report on the updated mineral resource estimate for the Eau Claire gold deposit, Clearwater project, Quebec, Canada. – Prepared for Eastmain Resources Inc. – 2017. – p. 156.
138. Technical report pertaining to the: Red Rice Lake Property. Rice Lake Volcano-Sedimentary Belt + Uchi Geological sub-Province, Nts Sheets 52113/52m04 Manitoba, Canada. – Prepared by: Alain Moreau, P. Geo (OGQ #1298). –2017. – p. 195.
139. Update mineral resource estimate technical report for the Goldboro Property Guysborough County, Nova Scotia, Canada. – For Orex Exploration Inc. – prepared by Mercator Geological Services Limited. – 2017.