

На правах рукописи



КУШНАРЕВ ПЕТР ИВАНОВИЧ

**Научно-методические основы количественной оценки
разведанности золоторудных месторождений.**

специальность 1.6.10 – Геология, поиски и разведка твердых
полезных ископаемых, минерагения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Москва, 2021

Работа выполнена в Федеральном Бюджетном государственном учреждении «Всероссийский институт минерального сырья им. В.М. Федоровского (ФБГУ «ВИМС»).

Официальные оппоненты: **Шумилин Михаил Владимирович**
доктор геолого-минералогических наук, профессор, почетный академик РАЕН, консультант НПП «Геосигма»
Душин Владимир Александрович
доктор геолого-минералогических наук, профессор ФГБОУ ВО УГГУ.
Макаров Владимир Александрович
доктор геолого-минералогических наук, профессор ФГБОУ ВО СФУ

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов»**

Защита состоится 01 ноября 2022 года в 15.00 на заседании диссертационного совета 24.2.364.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на сайте Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, <https://mgri.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.364.02 (Д.212.121.04)



Ганова С.Д.

Общая характеристика работы

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.

Детальность и полнота информации о полезном ископаемом реализуется в различных классификациях запасов и ресурсов. Практически все эти классификации используют, главным образом, качественные характеристики категорий, хотя попытки применить для них количественные показатели предпринимались более ста лет назад.

Особое значение количественная оценка разведанности запасов приобретает в настоящее время в условиях взаимодействия недровладельца (государства) и недропользователей с зарубежными инвесторами, а также с международными аудиторами. На основе оценки разведанности и полученных категорий запасов принимаются решения о финансировании предприятий и вложении инвестиций; определяются также уровни коммерческого риска,

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 включают:

- анализ практического опыта оценки месторождений,

- обобщение данных публичной отчетности, научно-технической литературы -отечественной и иностранной;
- статистический анализ геологоразведочных данных,
- геостатистические исследования и блочное моделирование,
- графический анализ морфологии рудных образований с определением ошибок геометризации, с оценкой размерности объектов на основе положений фрактальной геометрии;
- проведение расчетов на основе разработанных алгоритмов.

Научная новизна работы

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 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, в том числе таких как Наталка, Сухой Лог, Олимпиадинское, Вернинское, Дегдекан, Голец Высочайший, Тарынское, Дражное, Павлик, Чертово Корыто, Каральвеем, Бамское, Кючус, Нежданенское, Кундуми, Талгир, 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 1992г, материалы по ним чаще всего представлялись на Государственную экспертизу; эти же объекты далее наиболее интенсивно обрабатывались. В данный период значительная часть золоторудных месторождений была 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 их результатов с представлением материалов в ГКЗ РФ на месторождениях Наталкинское, Дегдекан, Вернинское, Чертово Корыто, Каральвеем, Павлик, Бамское, Нежданинское, Боголюбовское, Кючус, Дражное, Сергеевское, Светлинское, Куранахское рудное поле. В период 1985-1991г участвовал в научно-исследовательских работах на золоторудных месторождениях Узбекистана - Амантайтау, Даугызтау, Зармитан, Кызылалма, 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, Дражное, Зун-Холба, Дарасун, Березняковское, Березитовое, Александровское, Бараньевское рудное поле, Албазинское, Многовершинное, Асачинское, Озерновское, Благодатное, Бадран, Березовское, Тасеевское, Золотая Речка, Каральвеем 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 отрабатываемых 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:

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.

Теоретическая значимость работы определяется следующими положениями:

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

- показана возможность 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 в расчетах ошибок геометризации при отсутствии участков детализации.

- определено влияние на требования к величине критериев разведанности масштаба объектов и способов его отработки, а также устойчивости проекта освоения месторождения (уровня геологического риска).

Практическая значимость этих положений состоит в использовании их при определении сложности геологического строения и выборе параметров разведочной сети, а также при количественной оценке разведанности запасов в конкретных ситуациях.

Обоснованность и достоверность результатов.

Исследование опирается на фундаментальные российские и зарубежные работы, касающиеся оценки разведанности золоторудных месторождений и методологии их изучения. Достоверность результатов подтверждается конкретными примерами применения предлагаемых подходов к обоснованию сети и квалификации запасов, а также апробацией их на международных и всероссийских форумах и семинарах, а также публикацией статей в изданиях, рекомендованных ВАК.

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. Предложены подходы к изучению изменчивости содержаний на основе статистического и геостатистического анализа; даны рекомендации по интерпретации их результатов.

3. 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.

4. Разработана процедура расчета параметров разведочной сети, которая позволяет учитывать свойства конкретных объектов и разные требования к величине критериев разведанности.

5. Предложены приемы проведения работ по разрежению разведочной сети и интерпретации их результатов.

6. Сформулированы предложения по оценке потерь и разубоживания, с учетом фрактальной размерности и сложности строения объектов.

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 исследования 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 Международных форумах Minex (2006-2016), Международном семинаре ГКЗ-КРИПКО (2012), Евразийской Конференции (Минск, 2016, 2018), Всероссийских семинарах ЦКР-ГКЗ, семинарах МинГео Сибирь (2010-2021), Первой Всероссийской научно-практической конференции «Золото, Полиметаллы XXI век» (Челябинск, 2019г). Материалы диссертации в виде тезисов докладов и презентаций представлялись на сайтах форумов, семинаров и конференций. Они излагались также на Геовебинарах (2021-22).

Публикации: основные положения диссертации изложены в 28 работах, опубликованных в рецензируемых журналах из перечня, рекомендованного ВАК Минобрнауки РФ.

Структура работы: Диссертация включает: введение, шесть глав, заключение. Она имеет объем 212 страниц машинописного текста, содержит 88 иллюстраций, 36 таблиц и список литературы из 86 наименований.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю ФБГУ «ВИМС», доктору геолого-минералогических наук Машковцеву Григорию Анатольевичу - вдохновителю выполнения данной работы, начальнику отдела МГЭО и МР ФБГУ «ВИМС», кандидату геолого-минералогических наук Иванову Сергею Николаевичу и всему коллективу отдела. Хочу высказать искреннее уважение членам кафедры методики поисков и разведки МГРИ, многолетнее и плодотворное сотрудничество с которыми я ценю исключительно высоко. Особую признательность выражаю моим учителям – Каждану А.Б., Викентьеву В.А., Кашееву Л.П., чьи труды и идеи служили основой и отправной точкой данной работы. Приношу свою благодарность за понимание и поддержку моим друзьям и соратникам из различных организаций, занимающихся изучением и оценкой недр нашей страны.

Глава 1. Принципы оценки изученности и классификации запасов месторождений твердых полезных ископаемых.

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.

В предлагаемой работе рассматриваются аспекты изучения и оценки золоторудных месторождений, хотя основные выводы и подходы могут быть применены ко всем рудным объектам. Понятие «разведанность» запасов связано со свойствами, детальность изучения которых зависит, преимущественно, от параметров разведочной сети. 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.

Подход, основанный на выделении в рамках общей изученности геологического объекта аспектов, связанных только с их разведанностью, заложен в ряде зарубежных классификаций шаблона КРИРСКО, в том числе в Кодексе публичной отчетности JORC (2012г).

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, а также с методикой измерения/опробования и с параметрами разведочной сети (Рис. 1).

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, должны

рассматриваться как производные по отношению к оценке содержаний.



Рис. 1 Схема соотношения факторов разведанности запасов

Оптимальная стратегия изучения объекта предполагает проведение геологоразведочных работ по стадиям; на каждой из них обеспечивается равномерность размещения замеров в его объеме, в сочетании с созданием участков детализации.

Требования к разведанности и квалификации запасов/ресурсов. Различие разведанности отдельных блоков, рудных тел и залежей реализуется в категориях запасов/ресурсов, которые являются важным инструментом регулирования необходимости и достаточности их изучения.

Появление и развитие классификации запасов по степени разведанности произошло в начале XX века. Первая отечественная классификация запасов была введена в 1927 году. В ней предлагалось принять буквенные обозначения запасов, принятые на XI геологическом конгрессе по железным рудам (Стокгольм, 1910г), однако при описании категорий был сделан акцент на их промышленное использование.

Действующая российская Классификация прогнозных ресурсов и запасов твердых полезных ископаемых (2006 г.) предусматривает выделение по степени геологической

изученности запасов категорий А, В, С₁ и С₂. Предложенные формулировки требований к ним имеют качественный характер, что допускает разночтения в их трактовке. При квалификации запасов полезных ископаемых по категориям предполагается использование количественных и вероятностных оценок точности и достоверности определения основных подсчетных параметров. Вместе с тем это положение не подкрепляется конкретными рекомендациями по величине критериев для разных категорий запасов.

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). Россия является членом КРИПСКО с 2012 года. Основные положения классификации запасов/ресурсов, имеющиеся в шаблоне публичной отчетности, соответствуют Австралийскому Кодексу JORC. В большинстве кодексов отдельно рассматриваются ресурсы (resources) и запасы (reserves).

Одним из основных квалификационных признаков является достоверность оценки количества и качества полезного ископаемого. Количественно она может характеризоваться случайной погрешностью определения среднего значения того или иного параметра. Это положение постоянно используется в работах зарубежных исследователей.

В качестве другого квалификационного признака предлагается использовать понятие непрерывность оруденения (continuity), которое рассматривается как «геологическая непрерывность и непрерывность содержаний». Применительно к отечественным подходам она связывается с размерами рудных тел, что позволяет вычислять на их основе ошибки геометризации.

Сопоставление классификаций. Актуальной задачей настоящего времени является гармонизация отечественных и зарубежных стандартов отчетности, для решения которой необходимо провести их сравнение по основным положениям, а также по терминологическим аспектам.

По представлениям отечественных и зарубежных специалистов минеральные ресурсы категории *measured* соответствует категории A+B; категория *indicated* практически полностью согласуется с категорией C₁, частично – с категорией C₂. Минеральные ресурсы категория *inferred* рассматривается как эквивалент категории C₂ и частично – категории P₁.

Значительную трудность в сопоставлении результатов геолого-экономической оценки объектов по российским и зарубежным стандартам представляет то обстоятельство, что в первом случае запасы категории C₂ в полной мере учитываются при разработке кондиций, в то время как соответствующие им ресурсы категории *inferred* не участвуют в геолого-экономической оценке объекта и в обосновании инвестиций.

По результатам 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 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.

Глава 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.

Наряду с традиционными приемами особый интерес представляет использование положений фрактальной геометрии, которые ранее практически не применялись в данной области исследований.

Изучение морфологии рудных образований. 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), которые играют важную роль в выборе параметров разведочной сети и обосновании квалификации запасов.

В существующих методических документах одновременно дается описание элементов разных структурных уровней, что осложняет определение характеристик морфологии и количественных показателей сложности.

Целесообразно раздельно описывать объекты низких и более высоких уровней строения месторождений. Первые - минерализованные зоны и залежи, уверенно характеризуются на ранних стадиях геологоразведочных работ. Вторые - рудные тела, рассматриваемые как объекты селективной выемки, надежно оконтуриваются на стадии разведки и при ведении эксплуатационных работ.

Признаками объектов 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 так же 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. 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 – 10-50 млн. т, мелкие – менее 10 млн. т.

Морфологические классы (типы) положены в основу характеристики промышленных типов золоторудных месторождений, представленной в Методических рекомендациях ГКЗ (золото рудное, 2007). В соответствии с ними для золоторудных месторождений выделяются: штокверковый (мегаштокверковый) жильно-прожилковый (минерализованных зон, залежей) и жильный типы. Дополнительно, по морфологическим особенностям, условиям залегания и внутреннему строению, а также по характеру распределения золота классы подразделяются 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.

Масштаб месторождений, в определенной мере, согласуется с морфологическими типами. Уникальные и крупные месторождения, чаще всего, характерны для штокверков и минерализованных зон. Средние по масштабу объекты соответствуют всем морфологическим типам, за исключением трубообразных образований и штоков. Среди мелких объектов преобладают месторождения жильного типа.

Рудные тела, являющиеся объектами отработки, занимают только часть пространства зон или залежей. Их доля в общем объеме обычно характеризуется коэффициентом рудоносности (K_p). Данная характеристика не является, в полной мере, объективной, поскольку общепринятые правила оконтуривания

образований низких масштабных уровней в настоящее время отсутствуют.

Характеристика морфологии рудных тел. Эти объекты являются наиболее проблемными для исчерпывающего описания их формы. Ее основные характеристики зависят от: типа рудоконтролирующих факторов, 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 выклинивания, 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 количество выделяемых рудных интервалов и их мощности, что сказывается на оценке их морфологических свойств.

Возможности выявления формы рудных тел и описания ее характеристик определяются плотностью и геометрией сети наблюдений. В качестве «истинной» следует рассматривать форму, которая устанавливается при проведении эксплуатационных работ. При редкой сети пересечений форма тел оказывается всегда проще, чем в истинная.

Исследования ошибок геометризации показали, что их величина функционально связана с размерами рудных тел по разным направлениям, в том числе по падению и простиранию.

При оконтуривании рудных тел по относительно редкой сети, кроме их мощности и площади, можно оценить средние значения длины и ширины в пределах «разведочного» контура. Эти характеристики оказываются систематически выше, чем истинные, что определяется недостаточной плотностью разведочной сети для выявления деталей строения рудных тел. Для согласования «истинных» и «разведочных» размеров рудных тел требуется введение поправок, учитывающих параметры исходной и предельно плотной сети.

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.

Корректность использования формул математической статистики увязывается с соответствием эмпирического распределения какому-либо теоретическому закону.

Важной задачей является оценка погрешности определения средних содержаний полезного компонента (Δ) по выборкам, которая вычисляется как:

$$\Delta = t_a * V / \sqrt{N} \quad (1)$$

где: t_a – значение критерия Стьюдента при доверительной вероятности α , V – коэффициент вариации признака, N – объем выборки.

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. Данные изучения месторождений 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 смежных пробах - фактор связности.

Возможности использования приемов математической статистики в условиях выборок разного объема исследована в ряде работ [КС, Гуськов, Усиков]. Другие факторы исследованы в меньшей степени, однако в практике обработки

геологоразведочных данных для решения определенных задач они фактически считаются несущественными и 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. Эксперименты показывают, 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. Аналогичные выводы были представлены в работах других авторов, проводивших сравнение результатов вычисления погрешности оценки среднего с использованием формул, учитывающих различные виды распределений.

Важным условием изучения изменчивости, которое достаточно часто нарушается при обработке данных разведки, является статистическая однородность выборок. В число таких «нарушений» следует включить использование в них определений содержаний по пробам разной длины. Особенно негативное влияние на развитие количественных методов оценки разведанности запасов оказало изучение изменчивости содержаний полезного компонента по рудным интервалам, то есть по замерам, имеющим разную геометрическую базу. Вычисленные таким способом дисперсия и коэффициент вариации не могут использоваться для определения точности оценки средних содержаний. Способом преодоления этой ситуации является проведение композитирования, то есть пересчета содержаний на интервалы одинаковой длины.

Геостатистические методы и основы блочного моделирования. В настоящее время в практике представления результатов геологоразведочных работ широко используются горно-геологические информационные системы (ГГИС), в основу которых положены данные геостатистических исследований и результаты блочного моделирования.

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).

Вариограммы строятся по различным направлениям, 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.

Из анализа свойств вариограмм следует, что они отражают характеристики *изменчивости* в сочетании с *геометрическими свойствами* оруденения. Построение вариограмм на начальных этапах моделирования проводится по «минерализованным зонам», оконтуренным по «природному» борту, отдельным доменам и залежам, выделенным в каркасах, для построения которых используются разные принципы. Следовательно, выдержанность (continuity), определяемая по вариограммам через предел корреляции, характеризует именно эти объекты; к ним же относится характеристика дисперсии.

Для количественной оценки разведанности особый интерес представляют размеры рудных тел, выделенных по установленным кондициям. Задача определения этих размеров может быть решена через построение вариограмм индикаторов. Значения индикаторов характеризуют вероятность наличия руды в локальной области пространства месторождения. Предварительно в базе данных пробы, принадлежащие рудным интервалам, маркируются индексом 1, а разделяющие их безрудные или некондиционные промежутки обозначаются индексом 0.

Пределы корреляции, установленные по индикаторным вариограммам, характеризуют размеры рудных тел при оконтуривании их по соответствующим кондициям.

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. Присвоение ячейкам блочных моделей значения признака или интерполяция, 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.

Использование положений фрактальной геометрии при решении задач разведки и оценки месторождений.

Теоретические положения фрактальной геометрии 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. Для целей разведки и геолого-экономической оценки эти подходы ранее широко не применялись.

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, площади и объему.

Одной из задач, для решения которой могут быть использованы принципы фрактальной геометрии, является ***оценка сложности строения геологического объекта*** и в частности, описание морфологии рудных образований.

Исходными данными для определения размерности рудных образований в 2-D пространстве являются разрезы, планы и проекции, на которых установлена их форма. 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).

Наиболее простым и эффективным приемом оценки размерности D на плоскости является процедура box-counting. Она состоит в неоднократном наложении квадратной сетки с определенной длиной стороны на объект исследований. Процедура часто применяется для оценки размерности на плоскости, хотя легко обобщается на пространство любой размерности. Размерность Хаусдорфа D определяется через тангенс угла наклона графика, характеризующего зависимость количества «заполненных» ячеек от размера их стороны. Результаты изучения фрактальной размерности для ряда месторождений приведены в Таблице 1.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о связи показателя фрактальной размерности D с морфологическими типами объектов. Максимально высокие значения фрактальной размерности характерны для штокверковых месторождений.

Исследования свойств фрактальной размерности показали, что для конкретного месторождения она практически не зависит от объекта измерений – плана, разреза, проекции. Кроме того, величина D может быть определена с достаточной надежностью по отдельным участкам (фрагментам) рудных образований. Установлено также, что показатель размерности D сохраняется при изменении уровня бортового лимита.

С точки зрения задач разведки самоподобие рудных образований определяет их важное свойство, которое всегда интуитивно предполагалось исследователями – морфологические особенности минеральных зон, рудных залежей и рудных тел соответствует друг другу; меняется только масштаб измерений. Это обстоятельство позволяет на ранних стадиях, изучая образования низких масштабных уровней (зон, залежей) на ранних стадиях работ, предполагать основные черты морфологии образований более высоких уровней – рудных тел и рудных столбов.

Таблица 1

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	1,22-1,429
12	минерализованная зона	Березняковское	планы гор-тов	1,36-1,43
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

Теоретические положения фрактальной геометрии позволяют проводить анализ других показателей оруденения и математически описывать соотношения между ними. В число

таких зависимостей входит соотношение числа объектов и запасами в них полезного компонента, выражаемое известным «законом Ципфа». Наличие подобия или пропорциональности выражается в определенном соотношении между бортовыми содержаниями и другими характеристиками рудных объектов – запасами руды, средними содержаниями и запасами полезного компонента, которые исследуются при повариантном подсчете запасов. Положениям фрактальной геометрии соответствует зависимость между средним содержанием и запасами компонента, описываемая законом Э.Ласки.

Наличие пропорциональности (размерности) между количеством кристаллов алмазов в пробах и их крупностью позволяет оценивать степень алмазоносности объекта на ранних стадиях геологоразведочных работ, когда возможности отбора проб большого объема ограничены.

Глава 3. Оценка сложности строения природных объектов.

Существующие подходы к оценке сложности строения рудных объектов. Определение сложности геологического строения месторождений твердых полезных ископаемых является одной из важнейших процедур в отечественной практике ведения ГРР, которая зарекомендовала себя как эффективный инструмент для определения методики изучения рудных объектов и выбора параметров разведочной сети, особенно на ранних стадиях геологоразведочных работ.

Основные положения группировки месторождений были разработаны достаточно давно, но в настоящее время они требуют корректировки. Одной из причин совершенствования являются трудности, связанные с отсутствием надежных показателей сложности строения объектов. Кроме того, определенные группы месторождений фактически объединяют в себе объекты, различающиеся не только общим масштабом и размерами рудных образований, но степенью изменчивости свойств.

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.

Применение количественных показателей при описании морфологии объектов. 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. Указаны также предельные значения коэффициентов вариации содержания по пересечениям для месторождений, относимых к различным группам.

Основными недостатками таких показателей как коэффициент рудоносности (K_p) и показатель сложности (q) является их зависимость от параметров созданной сети, вследствие чего их объективное определение становится невозможным. Коэффициент вариации мощности, который предлагается рассматривать как характеристику сложности формы рудного тела, в действительности, является мало информативным показателем. Его значения могут быть сходными для объектов разного масштаба, с различной извилистостью и степенью тектонической нарушенности контуров.

Коэффициент вариации содержаний в существующей отечественной практике исследований характеризуется по рудным интервалам (пересечениям). Такой подход сложился во времена ограниченных возможностей проведения расчетов. В целом, он является несостоятельным, прежде всего, потому что выборки для его расчетов являются неоднородными по геометрической базе; его использование часто приводит к парадоксальным результатам.

Современные возможности математической обработки данных позволяют проводить исследования на выборках практически любого объема; имеется также возможность графического отображения полученных результатов.

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. Следует подчеркнуть, что в зарубежных подходах к изучению изменчивости также используются ее характеристики по пробам.

Содержания по пробам или композитам 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.

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.

Для описания сложности геологического строения золоторудных объектов предлагается использовать характеристики, поддающиеся однозначному определению и количественной оценке. В результате выполненных исследований 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...(2007г) дается только качественное деление золоторудных объектов по этому признаку. Сам по себе масштаб оруденения в исключительно редких случаях может быть однозначно установлен в процессе ведения геологоразведочных работ. Очень часто эта характеристика меняется во времени, как вследствие прироста запасов, так и в результате изменения требований промышленности к качеству минерального сырья.

Более устойчивой и однозначно определяемой характеристикой, связанной с масштабом объекта, является годовая производительность предприятия. Оценка масштаба объекта через проектную или фактическую производительность горнодобывающего предприятия позволяет более корректно учесть его потребности при проектировании и ведении добычных работ.

По величине годовой производительности, которую можно рассматривать как шкалу для измерения масштабов месторождения, предлагается провести разделение объектов на следующие группы: более 15 млн. т, 5-15 млн. т, 1.5-5 млн. т, 0.5-1.5 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 5-15 млн. т, третьей группе – 1.5-5 млн. т и 0.5-1.5 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 производительность предприятия за определенный период времени также 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.

Изменчивость содержаний, оцененная по пробам или по композитам, достаточно просто определяется на ранних стадиях работ даже по ограниченному объему опробования. Степень

изменчивости содержаний можно условно разделить на низкую, средней, высокую и весьма высокую. По величине коэффициента вариации это соответствует значениям: менее 150 %, 150-250 %, 250-350 % 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. В случае, если длина проб или композитов отличается от данного значения, в величину коэффициента вариации вносится поправка, учитывающая этот фактор и вычисляемая как корень квадратный из длины пробы, деленной на 1 м.

В сравнении с классификацией золоторудных месторождений по сложности строения, представленной в Методических Рекомендациях...(2007г), в данных предложениях предусматривается более дробное деление на подгруппы в зависимости от масштаба месторождения. Кроме того, предлагается дробное деление объектов по степени изменчивости, что также дает возможность более корректно проводить выбор параметров разведочной сети.

Объекты оценки сложности геологического строения.

Условием отнесения месторождения к определенной группе сложности по существующим положениям является 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. В максимальной степени различия этих свойств проявляются для частей месторождения, обрабатываемых открытым (ОГР) и подземным способами (ПГР). При переходе на подземный способ отработки и «ужесточении» кондиций существенно уменьшаются размеры рудных тел, повышается неопределенность их оконтуривания, что само по себе позволяет говорить об изменении сложности строения объекта. Для разведки запасов таких тел по определенной категории требуется относительно более плотная сеть, чем для рудных тел, выделяемых по кондициям для условий ОГР.

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.

Таким образом, объектом оценки сложности строения могут быть части месторождения объекта, 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.

Глава 4. Методы обоснования разведочной сети

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. 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. 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 детальностью изучения оруденения, которая отражается в категориях запасов.

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. В их качестве рассматриваются: *точность оценки* параметра или его доверительный интервал и *ошибки геометризации*, то есть ошибки в определении пространственного положения рудного тела.

Возможность отнесения запасов к той или иной категории, регулируется предельными значениями критериев для каждой из них.

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.Яковского и других авторов.

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 ГКЗ, в которой для каждой из групп приведены параметры разведочных сетей, применявшихся для оценки запасов разных категорий. 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.

Обоснованию сети с использованием *погрешности или точности оценки* запасов посвящена основная часть публикаций по данному вопросу. 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.

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.

По мнению В.М. Крейтера, наиболее важным признаком оруденения является содержание полезного компонента, так как последствия неверных оценок среднеблочных содержаний проявляются на экономических показателях горного предприятия с первых же дней его работы.

Авторами публикаций на тему выбора предельных значений погрешности для оценки запасов определенных

категорий давались различные предложения. Например, для запасов категории C_1 допустимые значения этого критерия изменяются от 30 до 60 %; способ характеристики ошибки в рекомендациях не указывается.

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

Основными приемами оценки погрешности определения геологоразведочных параметров экспериментальным путем являются метод разрежения и метод сопоставления с данными отработки. Каждый из этих методов имеет ряд недостатков, осложняющих их практическое применение. В первом случае необходимо наличие участков детализации, в пределах которых создана сеть с высокой плотностью наблюдений; кроме того, отсутствуют единые подходы к интерпретации полученных результатов. Во втором случае на сходимость цифр запасов 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 (Δ) при заданной вероятности оценивается по формулам математической статистики:

$$\Delta = t_a * V / \sqrt{N} \quad (2)$$

где: t_a – значение критерия Стьюдента для заданной доверительной вероятности α ,

V – коэффициент вариации геологоразведочного параметра, %, N – объем выборки.

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 (N), 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 A и B , однако их количество несопоставимо меньше, чем запасов категории C_1 и C_2 . Соотношение категорий запасов 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.

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*. Количественное

описание связи параметров сети и корректности определения пространственного положения контуров рудного тела было впервые предложено Д.А. Зенковым в 1959 г. Для оценки ошибок геометризации по эмпирическим данным В.А. Викентьевым была предложена формула (1969 г), в основе которой лежит сравнение истинных и разведочных контуров рудных тел, а также определение площадей «искажающих» площадок. В зависимости от шага сети величина ошибок геометризации, выраженная в относительном виде, изменяется от 0 до 100%.

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. Результаты исследований представляются в виде таблиц или графиков (Рис. 2), выражающих изменение величины критерия в зависимости от геометрии или шага разведочной сети.

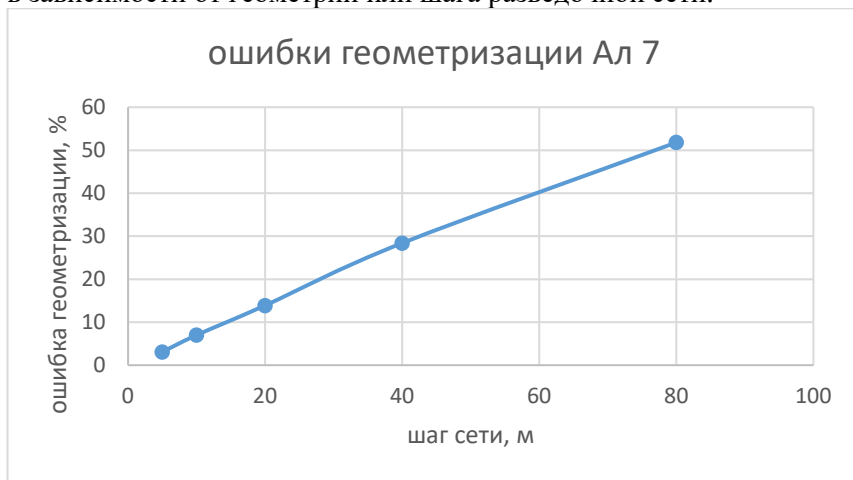


Рис. 2 График зависимости ошибок геометризации от шага сети

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

$$\delta(A) = 100 \cdot A / 4L, \% \quad (3)$$

где: A – шаг сети по заданному направлению, L – средние размеры объекта по данному направлению.

Для оценки ошибок геометризации в случае оконтуривания рудных тел в проекции, аналитическое выражение имеет вид:

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

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

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

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.

Принципы выбора параметров сети в зарубежных стандартах. В зарубежных стандартах общепринятой является классификация, изложенная в стандарте JORC (Глава 2). Можно отметить, в ней не используются группировки месторождений по сложности строения и обобщения, ориентирующие на выбор параметров разведочной сети на ранних стадиях геологоразведочных работ.

Анализ материалов по оценке месторождений, выполненных зарубежными специалистами и аудиторами, а также публикации, касающиеся квалификации запасов/ресурсов, 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 practics»;
- количественные методы, опирающиеся на изучение изменчивости признаков и использование вариограмм.

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, однако единообразные требования к критериям и определению их предельной величины для запасов разных категорий не установлены.

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. Шаг сети, при котором обеспечивается уверенная геометризация запасов для квалификации их по требуемой категории, определяется по вариограммам. Этот подход в отчетах используется достаточно широко, однако рекомендации по его применению в регулирующих документах не приводятся.

Предложения по совершенствованию обоснования разведочной сети. Разработанная концепция обоснования геометрии разведочной сети базируется на количественных критериях разведанности, а также на изучении свойств полезного ископаемого. 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. Рекомендуются также оценивать изменчивость содержаний полезного компонента относительно проб равной длины или

композитов. Морфологические особенности объектов предлагается учитывать с использованием вариограмм индикаторов и фрактальной размерности рудных образований. С этих позиций предлагаемые подходы существенным образом отличаются от приемов обоснования сети, применявшихся ранее.

Обоснование параметров сети с позиций погрешности оценки запасов. Алгоритм обоснования параметров сети с привлечением количественного подхода включает следующие операции:

- определение производительности предприятия на основе масштаба оруденения по формуле Тейлора или по результатам разработки ТЭО временных кондиций;
- определение с учетом величины объемной массы объема блока, соответствующего годовой производительности (БГП);
- 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/наблюдений на рудный объем недр, соответствующий годовой производительности рудника;
- расчет суммарной площади сечений блока как отношение объема к длине пробы или композита, пересчитанных на истинную мощность;
- вычисление площади ячейки сети как отношение объема БГП к «истинной» длине пробы и к необходимому числу наблюдений;
- оценка параметров сети (расстояний между разрезами и пересечениями на разрезе) с учетом величины коэффициента анизотропии.

Производительность предприятия устанавливается в горнотехнической части ТЭО кондиций или вычисляется с использованием формулы Тейлора.

Оценка вариабельности по пробам (дисперсия и коэффициент вариации) выполняется по стандартной процедуре. Предварительно осуществляется композитирование проб в

границах рудных интервалов, выделенных по установленным кондициям. Влияние на величину случайной составляющей дисперсии закономерных изменений признака определяется по вариограммам.

Для обоснования параметров сети предлагается использовать относительное стандартное отклонение, значение критерия Стьюдента принимается равным 1. Расчет необходимого числа наблюдений/разведочных проб (N) в этом случае выполняется по формуле:

$$N = (V / S_{\text{доп}})^2 (5)$$

V – коэффициент вариации содержаний по пробам или композитам;

$S_{\text{доп}}$ – допустимое относительное стандартное отклонение.

Параметры разведочной ячейки вычисляются с учетом коэффициента анизотропии свойств объекта, который на золоторудных месторождениях обычно 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 с различного масштаба и с разными значениями коэффициентов вариации содержаний по пробам. Диаграммы составляются для разных допустимых стандартных отклонений (ДСО). Уровень ДСО, равный 10% (Рис. 3) принят как наиболее близкий к предложениям зарубежных исследователей для категории ресурсов *indicated*, которая соответствует категории C_1 на отечественных месторождениях.

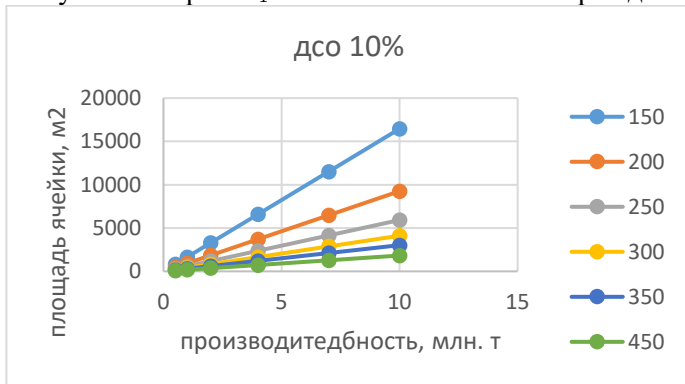


Рис. 3 Площади ячейки сети при допустимой погрешности 10% (категория C_1) при разных значениях коэффициентов вариации.

Предложенный подход к обоснованию параметров сети позволяет дифференцированно учитывать свойства орудения как по разным объектам, так и по участкам в пределах одного объекта; он дает возможность рассматривать различные требования к погрешности оценки запасов и может быть использован на ранних стадиях работ. Его эффективность доказывается примерами расчетов параметров сети для конкретных месторождений.

Обоснование сети с использованием метода разрежения.

Разрежение разведочной сети является одним из распространенных методов обоснования ее параметров. Недостатками его использования является неопределенность требований к исходным данным по участкам детализации, некорректность проведения расчетов и ошибки в интерпретации полученных данных.

Рекомендации по его совершенствованию включают следующие предложения:

- оценивать собственную ошибку в оценке параметра по исходному объекту;
- использовать все варианты наложения сети;
- вычислять относительное стандартное отклонение по результатам разрежения;
- вводить поправки в определение погрешностей, учитывающие различие запасов по участкам детализации и запасов в БГП.

Выполнение этих рекомендаций обеспечивает возможность объективного сопоставления полученных результатов расчетов с требованиями к точности оценки запасов для определенных категорий.

Оценка ошибок геометризации на основе положений фрактальной геометрии.

Определения ошибок геометризации на основе эмпирических и аналитических методов опираются на представления об «истинных» характеристиках формы, которые устанавливаются на участках с предельно высокой плотности наблюдений. При отсутствии участков детализации эти характеристики остаются неизвестными.

Задача определения величины этого показателя 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 (сети сопровождающей эксплоразведки).

Фрактальная размерность D оценивается по аналогии на основе определения морфологического типа объекта. Размеры (шаг a) предельно плотной сети для условий открытой отработки может составлять 4-5 м; при подземной отработке – 2-3 м.

Для расчетов величины ошибки геометризации предлагаются взаимосвязанные способы, применение каждого из которых диктуется конкретными условиями.

Один из них основан на определении фактических размеров рудных тел, ($L_{\text{факт}}$) в сечениях при выбранном шаге сети A . Пересчет их в «истинные» размеры производится делением на поправочный коэффициент: $K_{\text{попр}} = D^{0.25 \cdot A/a}$ (6). Далее ошибка геометризации вычисляется по аналитическому выражению 3.

Второй подход базируется на определении средней ширины площадей, в пределах которой происходят искажения разведочного контура относительно истинного. Он не требует графических построений, но отличается меньшей корректностью. Средняя ширина искажающей площадки H_s может быть оценена по выражению:

$$H_s = A/20 \cdot (K_{\text{уд}}^2 - 1)^{0.5} \quad (7);$$

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. Коэффициент удлинения ($K_{\text{уд}}$), учитывает соотношение истинного периметра рудного тела и периметра, установленного по разведочным данным:

$$K_{\text{уд}} = P_{\text{ист}} / P_{\text{разв}} = (A/a)^{D-1} \quad (8)$$

где: $P_{\text{ист}}$ – периметр рудного тела при наименьшем шаге a ;
 $P_{\text{разв}}$ – периметр рудного тела по данным разведки при шаге сети A ;

D – размерность Хаусдорфа.

Величина ОГ вычисляется как: $\delta_{(A)} = H_s / m \cdot 100\%$.

Возможность использования данных подходов проверена на основе расчетов по ряду объектов.

Оценка ошибок геометризации с использованием вариограмм. Связь ошибок геометризации с характеристиками вариограмм до сих пор оставалась не осознанной, хотя исследователи за рубежом рассматривают последние как показатель выдержанности (continuity) оруденения; на этой основе часто выполняется квалификация запасов.

В действительности вариограмма представляет собой функцию, в которой проявляется взаимозависимость геометрических особенностей объекта с характеристиками его изменчивости. Обычно, эти функции строятся для содержаний в пределах минерализованных зон, залежей и доменов; они характеризуют размеры элементов неоднородностей только для этих объектов. Установленные по таким вариограммам пределы корреляции, не увязываются с размерами рудных тел, выделенных по определенным кондициям. Это противоречие можно устранить, если для анализа использовать значения индикаторов применительно к разным бортовым содержаниям. В этом случае повышение последних приводит к уменьшению расстояний выхода вариограмм на пороговые значения, что вполне соответствует тенденции сокращения размеров рудных тел при «ужесточении» бортового лимита.

Использование вариограмм для оценки ошибок геометризации предполагает определение средних размеров рудных тел по падению или простираию и вычисление ошибок геометризации по аналитическому выражению 3.

Следует отметить, что определение ОГ с использованием вариограмм, обладает большей универсальностью, в сравнении с эмпирическими оценками. Вместе с тем, данный подход может применяться только в случае, когда имеется достаточная информация для относительно надежного их построения.

Анализ данных по разведанным месторождения показывает, что корректировка сети по величине ошибок геометризации требуется в относительно редких случаях; она может осуществляться на отдельных участках, характеризующихся сложностью морфологии оруденения.

Глава 5. Критерии разведанности и их допустимые значения для категорий запасов.

Из анализа требований к изученности запасов/ресурсов рудных месторождений в различных стандартах отчетности следует, что основными критериями разведанности являются: *погрешности оценки* геологоразведочных параметров и *ошибки геометризации* рудных тел.

Предельные значения этих критериев для запасов различных категорий по ряду причин в настоящее время однозначно не установлены.

С целью обоснования их допустимых значений были проведены исследования по определению их фактических величин на уже разведанных месторождениях, запасы которых прошли апробацию в ГКЗ. Были изучены погрешности оценки запасов, а также величины ошибок геометризации применительно к имеющейся плотности разведочной сети. Исследования были выполнены относительно категории C_1 , которую можно рассматривать как базовую для объектов разного масштаба.

Анализ разведанности месторождений с позиций погрешности оценки параметров подсчета. В качестве основного параметра подсчета принято содержание золота. 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.

Расчеты по определению фактических погрешностей оценки содержаний проводились на основе описанного ранее алгоритма, в котором используются формулы математической статистики. Возможности их применения были изучены с использованием вариограмм. Было установлено, что влиянием закономерной составляющей изменчивости на определение погрешности оценки средних содержаний для запасов категории C_1 можно пренебречь.

Изучаемые отечественные месторождения были условно разделены по производительности (масштабу) на группы: более 5

млн.т/год, 1-5 млн.т/год и менее 1 млн.т/год. По сложности строения они относятся к разным группам классификации ГКЗ.

Фактические погрешности оценки содержаний для запасов категории C_1 для крупных и средних месторождений (производительность более 5 млн. т) изменяются в пределах 6.0-13 % и составляют, в среднем 9.7 %. Для средних месторождений они находятся в пределах 4.6-23.1 %; составляя, в среднем, 10.8 %. Для мелких по масштабу месторождений фактические погрешности изменяются в пределах 5.0-32. 8%; в среднем она составляет 18.3 % (Рис. 4).

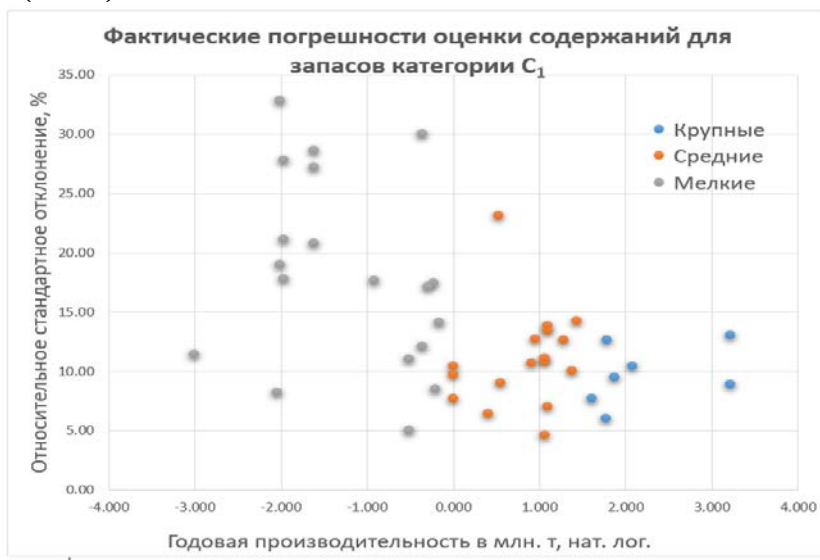


Рис. 4 Корреляционное поле точек фактических погрешностей оценки содержаний в зависимости от годовой производительности предприятия.

Таким образом, обнаруживается тенденция увеличения фактических погрешностей оценки содержаний от крупных и уникальных месторождений к мелким.

Аналогичные расчеты по оценке фактических погрешностей были проведены на зарубежных золоторудных объектах для ресурсов категории indicated. Исходные данные для сопоставления приняты из публичной отчетности о ресурсах (2005-2019 гг.), выполненной в стандартах NI 43-101 и JORC. Было

установлено, что 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 С₁.

Установленные в результате проведенных исследований уровни фактических относительных погрешностей оценки средних содержаний, предлагается принять за основу в качестве допустимых/предельных для запасов категории С₁. В сводном виде рекомендации по уровням допустимых погрешностей оценки средних содержаний для разных категорий приведен в Таблице 2.

Таблица 2

Допустимые погрешности оценки средних содержаний (%) для
категорий запасов

Кат-рии запасов	объемы недр, сопоставимые с производительностью.	масштаб месторождений		
		уник. и крупные	средние	мелкие и оч. мелкие
В	квартальной	10	12,5	15
	годовой	5	6,2	7,5
С ₁	годовой	10	12,5	15
С ₂	годовой	20	25	30

Рекомендованные значения допустимых погрешностей могут, в некоторой мере, корректироваться с учетом задач и условий освоения конкретного объекта.

Анализ разведанности месторождений на основе ошибок геометризации. Фактические величины ошибок геометризации для запасов категории С₁ изучались ранее на ряде месторождений, в особенности на месторождениях урана [В.А. Викентьев, М.В. Шумилин]. Результаты этих исследований отражены в работах В.А. Викентьева, И.А. Карпенко, М.В. Шумилина и других авторов [4, 5, 22, 23]. Было установлено, что предельная величина ошибок геометризации для запасов категории С₁ в сечениях может составлять 30-50 %. Для проекций рудных тел она не превышала 30%.

Такого рода исследования были проведены автором на обрабатываемых золоторудных месторождениях. Эмпирические

оценки ошибок геометризации в сечениях для них при шаге сети, использованном для разведки запасов категории C_1 , изменяются в пределах 8.1-42.5%. Для жилообразных рудных тел, оконтуренных на проекциях, величина ошибок геометризации, в основном составляла менее 30%. Эти значения, в целом, соответствуют предложениям о допустимой величине этого критерия для других типов рудных месторождений.

Экономические риски и разведанность запасов. Эмпирически сложившиеся требования к погрешности оценки параметров запасов. могут быть рассмотрены с позиций экономических рисков освоения месторождений. Ошибки в оценке содержаний полезного компонента не участвуют в анализе чувствительности проектов, хотя они непосредственным образом сказываются на их устойчивости.

Вероятность безубыточной работы предприятия за определенный период времени может быть оценена на основе изложенных выше подходов к оценке погрешности средних значений признака. Предложенная процедура приближенного расчета допустимой погрешности включает оценку систематических и случайных ошибок подсчета. На ее основе могут определяться параметры сети опережающей эксплуатационной разведки. В целом, низкая разведанность объектов и наличие разного рода ошибок в определении параметров запасов снижает их инвестиционную привлекательность и стоимостную оценку.

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. Можно предполагать, что допустимые значения погрешностей оценки содержаний являются разными для месторождений различных видов полезного ископаемого.

Ошибки геометризации имеют разное значение для условий открытой и подземной отработки; в последнем случае они являются ведущим фактором разведанности.

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 (Таблица 3), основанная на результатах выполненных исследований с учетом допустимых количественных значений критериев. Она ориентирована на выбор параметров сети для категории C_1 , которую можно рассматривать как базовую относительно запасов других категорий. Основным показателем для определения параметров сети является площадь ячейки.

Таблица 3

*Типизация золоторудных месторождений для целей разведки
запасов категории C_1*

Группа	Масштаб, запасы руды	А, млн т/год	Морфологический тип	D	коэфф. вариации по пробам,			
					1,5	1,5-2,5	2,5-3,5	>3,5
2	Уникальные и крупные, более 250 млн т руды	> 15	штокверки	1,4-1,6	15000	7500	3500	-
			минерализованные жильно-прожилковые зоны залежи	1,3-1,4	16000	8000	4000	-
			прожилково-вкрапленных руд	1,1-1,3	18000	10000	5000	-
	Крупные, 100-250 млн т руды	5-15	штокверки	1,4-1,6	8000	4000	2500	-
			минерализованные жильно-прожилковые зоны залежи	1,3-1,4	10000	5000	3000	-
			прожилково-вкрапленных руд	1,1-1,3	12000	6000	3000	-
3	Средние, 20-100 млн т руды	1,5-5	жилы простого строения	1,1-1,2	10000	5000	2500	-
			штокверки	1,4-1,6	6000	3000	2000	-
			минерализованные жильно-прожилковые зоны залежи	1,3-1,4	6000	3500	2500	-
			прожилково-вкрапленных руд	1,1-1,3	6000	3500	2200	
			жилы простого строения	1,1-1,25	5000	3000	2000	
			жилы сложного строения	1,25-1,5	4000	2500	1500	

Окончание Таблицы 3

Группа	Масштаб, запасы руды	А, млн т/год	Морфологический тип	D	коэфф. вариации по пробам,			
					1,5	1,5-2,5	2,5-3,5	>3,5
3	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
4	Весьма мелкие, < 5 млн т руды	< 0,5	минерализованные жильно-прожилковые зоны	1,3-1,5	1500	800	600	300
			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

Типизация использует показатели, достаточно просто определяемые на ранних стадиях работ по фактическим данным или на основе аналогии. Предлагаемые параметры сети могут уточняться с учетом требований к величине ошибки геометризации.

Глава 6. Квалификация запасов

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.

В отечественной практике оценки месторождений разведанность отдельных подсчетных блоков традиционно осуществляется на качественном уровне методом экспертных оценок, который опирается на определенные эмпирически сложившиеся правила. Основное внимание при решении данной задачи уделяется фактической плотности разведочной сети и ее соответствию сети, рекомендованной для данной группы сложности геологического строения объекта. При подсчете запасов с применением коэффициента рудоносности учитывается его величина; части залежей с коэффициентом рудоносности менее 0.5, как правило, квалифицируются по категории С₂. Кроме того, к этой же категории относятся запасы блоков, опирающихся на малое число (менее 3-4) разведочных пересечений.

В зарубежной практике 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). Пример квалификации ресурсов, основанной на этих принципах, приведен на Рис. 5.

Кроме расстояний между разведочными пересечениями при квалификации запасов учитываются также число проб, которые участвуют в интерполяции содержаний в ячейки модели, и количество выработок.

Другим показателем для квалификации ресурсов, который обсуждается в литературных источниках, является погрешность оценки содержаний. Оценка таких погрешностей проводится по достаточно сложным методикам, в том числе по процедуре

стохастического случайного моделирования (СТО), использующей в своей основе блочные модели.

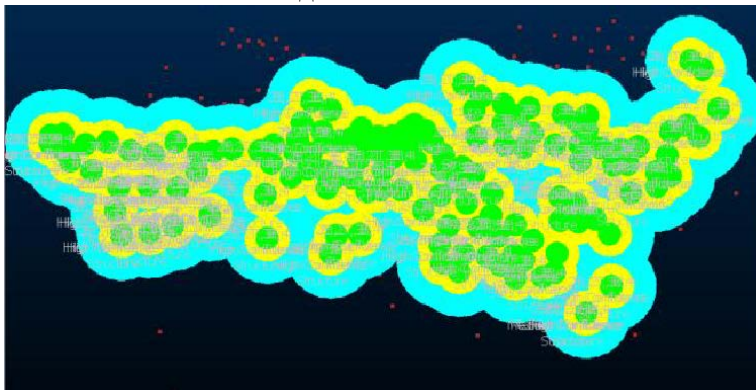


Рис. 5 Участки с разной квалификацией запасов/ресурсов в проекции на плоскости рудного тела; зеленое – категория *measured*, желтое – категория *indicated* и голубое – категория *inferred*

Отмеченные приемы количественной оценки разведанности ресурсов/запасов формально не указаны в регулирующих документах и не являются обязательными.

В сравнении с принципами классификации запасов, принятыми в РФ, требования аудита к квалификации ресурсов являются более «строгими». В ряде случаев часть запасов категории C_1 на отечественных месторождениях была отнесена аудитом к категории *inferred* и исключалась из геолого-экономической оценки.

Квалификация запасов на количественной основе - предлагаемый подход. Различие условий оценки запасов по блокам предопределяет неоднозначность их квалификации в конкретных ситуациях. Объективность решения данной задачи обеспечивается использованием количественных подходов.

Предлагаемая на их основе процедура базируется на анализе изменчивости содержаний и определении погрешности их оценки с учетом числа наблюдений (проб) в конкретных блоках. В значения погрешности вводятся поправки, учитывающие несоответствие запасов в блоке запасам в объеме, сопоставимым с годовой производительностью предприятия.

Пример проведения таких расчетов по одному из золоторудных месторождений типа минерализованных зон, относящегося к средним по масштабу, представлен в Таблица 4.

Таблица 4
Погрешности определения содержаний и квалификация запасов по подсчетным блокам

блок	число проб	К вар	запасы т.т	площ. на 1 пробу	пр-ть г.т/год	соотношение	погр-ть в блоке	погреш на год. пр	квалиф.
4-C ₂	48	235	52	416	3000	0.017	33.9	4.5	C ₁
5-C ₂	57	235	17.9	122	3000	0.006	31.3	2.4	C ₁
6-C ₂	178	235	353	765	3000	0.118	17.6	6.1	C ₁
7-C ₂	574	235	1998	1338	3000	0.666	9.8	8.0	C ₁
8-C ₂	108	235	1000	3565	3000	0.333	22.6	13.1	C₂
9-C ₂	350	235	1337	1468	3000	0.446	12.6	8.4	C ₁
10-C ₂	142	235	2291	6227	3000	0.764	19.8	17.3	C₂
11-C ₂	429	235	2173	1946	3000	0.724	11.3	9.7	C ₁
12-C ₂	287	235	2278	3049	3000	0.759	13.9	12.1	C₂
13-C ₂	336	235	499.2	572	3000	0.166	12.8	5.2	C ₁
14-C ₂	355	235	547.7	593	3000	0.183	12.5	5.3	C ₁
16-C ₂	168	235	1106	2528	3000	0.369	18.1	11.0	C₂
17-C ₂	259	235	1197	1775	3000	0.399	14.6	9.2	C ₁
18-C ₂	382	235	1228	1238	3000	0.409	12.0	7.7	C ₁
19-C ₂	413	235	1119	1043	3000	0.373	11.6	7.1	C ₁

На стадии составления ТЭО кондиций запасы по основной части блоков были предварительно квалифицированы по категории C₂. Каждый из блоков характеризуется разным числом проб и величиной запасов. Коэффициент вариации содержаний в пробах по всей группе блоков равен 235%. Геостатистический анализ показал, что поправки за влияние закономерной составляющей дисперсии могут не вводиться.

Если принять, что предельное значение относительного стандартного отклонения для запасов категории C₁ должно составить 10%, то к категории C₂ следует отнести только блоки 8-

C₂, 10-C₂, 12-C₂ и 16-C₂; для остальных блоков величина погрешности ниже установленного предела.

Для уверенной квалификации запасов в блоках дополнительно необходимо определить возможную величину ошибок геометризации. Результатами геостатистического анализа, установлено, что пороговые расстояния по простиранию составляют около 40 м, а по падению – менее 50-60 м. Принятые для категории C₁ параметры сети соответствуют этим размерам, в связи с чем ошибки геометризации по направлениям могут составлять 25-40%. Этот уровень считается достаточным для квалификации запасов по данной категории.

Сопоставление результатов квалификации запасов/ресурсов на основе зарубежных, отечественных и рекомендуемого подходов. Эффективность различных подходов к квалификации запасов с позиций гармонизации стандартов отчетности следует оценивать на примерах по конкретным объектам. Одним из них может служить золоторудное месторождение Намдины (Гана).

Месторождение локализуется в породах бирримской серии протерозоя и представляет собой минерализованную зону шириной до 300м и длиной более 1000 м с падением на ССЗ под углом около 60°. Основная часть месторождения разведана наклонными скважинами колонкового бурения по сети 50х50-80 м, причем сеть характеризуется значительной неравномерностью. В южной части имеется участок детализации, где создана сеть 25х10-15м. Глубина разведки - около 250м. В качестве оптимального для оконтуривания 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.

С позиций традиционного отечественного подхода по размерам и степени изменчивости содержаний данный объект заслуживает отнесения его к третьей группе классификации ГКЗ, для разведки которой рекомендуется сеть скважин 40-60х40-60м. Запасы в пределах участка детализации уверенно могут быть классифицированы по категории В. В оставшейся части месторождения имеются участки, где площадь ячейки сети

составляет 2500-3000м², что позволяет классифицировать часть запасов здесь по категории C₁.

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 показывает, что с позиций точности оценки средних содержаний на участке детализации, где средняя площадь разведочной ячейки составляет 300м² (20x15м), могут быть выделены ресурсы категории measured. Возможность отнесения к этой 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 4000-5000 м² категория ресурсов может быть снижена до inferred; доля таких ресурсов несколько ниже, чем оценено в отчете. Таким образом, предлагаемый количественный подход в целом, не противоречит классификации ресурсов, предложенной аудитом, хотя уточняет ее в части выделения ресурсов категории measured.

Заключение

Представленная работа предлагает целостную концепцию оценки разведанности запасов на основе количественных показателей. Решение ее 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. Исследования по данной тематике проведены на объектах, обладающих разным масштабом и относящихся к различным морфологическим типам. При их выполнении 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, в основе применения которой лежит принцип аналогии. Предлагаемые ранее для определения сложности количественные показатели как установлено проведенным анализом, являются несостоятельными. Для решения этой задачи в работе в качестве классификационных признаков предложено использовать масштаб оруденения (годовая производительность), морфологический тип и фрактальную размерность, а также оценку изменчивости содержаний компонента про пробам или композитам. Одним из методов исследования этих признаков является статистический и геостатистический анализ.

Существующие методы обоснования параметров разведочной сети опираются на качественные и количественные подходы. Сложности их практического применения заключаются в отсутствии общепринятых критериев для запасов разных категорий.

На основе проведенных исследований разработаны оригинальные процедуры определения параметров разведочной сети. При расчетах учитываются свойства объектов, выявленные для разных условий оконтуривания оруденения. 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.

Для оценки ошибок геометризации (ОГ), особенно на ранних стадиях геологоразведочных работ, предложены подходы, основанные на использовании принципов фрактальной геометрии. Установлено также, что пределы корреляции (range) вариограмм индикатора характеризуют средние размеры рудных образований при разных значениях бортовых содержаний. Эти подходы дают возможность оценивать ошибки геометризации, применительно к выбранным параметрам сети, аналитическим путем при отсутствии участков детализации.

Обязательным условием обоснования параметров разведочной сети и квалификации запасов по различным категориям являются *допустимые значения критериев*

разведанности; до настоящего времени в методических документах они однозначно не установлены.

С целью решения этой задачи по разработанной методике был выполнен анализ разведанности отечественных объектов разных морфологических типов и масштабов применительно к запасам категории C_1 . Впервые были установлены фактические погрешности оценки средних содержаний золота для месторождений разного масштаба. Аналогичные исследования проведены по материалам публичной отчетности для зарубежных месторождений золота применительно к ресурсам категории *indicated*. Полученные результаты сопоставимы по значениям этого критерия с данными для отечественных месторождений, что дает возможность говорить о гармонизации подходов.

Результаты исследований *ошибок геометризации* на разведанных месторождениях показали, что для по категории C_1 их величина по сечениям составляет 20-50%, а на проекциях не превышает 30%. В зарубежной практике квалификации запасов предусматривается анализ вариограмм, в соответствии с которым допустимая величина ошибок геометризации ресурсов категории *indicated* составляет 20-25%. Для ресурсов категории *measured* допустимые пределы этих ошибок снижаются до 10-20%.

В работе представлена типизация золоторудных объектов, позволяющая осуществлять выбор параметров разведочной сети категории C_1 на разных стадиях разведочных работ. Ее разработка опирается на изложенные принципы группировки золоторудных месторождений по сложности строения и установленные допустимые значений критериев разведанности.

Квалификацию запасов предлагается выполнять на основе количественных подходов и изложенных выше принципов.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих трудах:

Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Кушнарв П.И., Сидорков Е.А. Опыт применения интервальных оценок для характеристики среднего содержания на примере одного из месторождений. Изв. ВУЗов, Геология и разведка, 1967, № 4, С.67-70.

2. 2, Каждан А.Б., Кащеев Л.П., Кушнарев П.И. Некоторые вопросы методики разведки и опробования прибрежно-морских россыпных месторождений. Изв. ВУЗов, Геология и разведка, 1974, № 1, С.92-98.

3. Кащеев Л.П., Кушнарев П.И. О выборе разведочной сети при разведке прибрежно-морских россыпных месторождений. Изв. ВУЗов, Геология и разведка, 1975, № 11, С.115-120.

4. Викентьев В.А., Кушнарев П.И. О главных факторах, определяющих степень разведанности запасов месторождений твердых полезных ископаемых. Изв. ВУЗов, Геология и разведка, 1978, № 6, С.80-85.

5. Викентьев В.А. Воронцов В.А., Кушнарев П.И., Ясковский П.П. Об ошибках геометризации и способах оконтуривания тел полезных ископаемых Изв. ВУЗов, Геология и разведка, 1978, № 8, С.83-89.

6. 6, Викентьев В.А. Воронцов В.А., Кушнарев П.И., Ясковский П.П. О свойствах ошибок геометризации. Изв. ВУЗов, Геология и разведка, 1979, № 2, 77-84.

7. Викентьев В.А. Воронцов В.А., Кушнарев П.И., Ясковский П.П. Оценка степени разведанности прерывистого оруденения (статья 1). Изв. ВУЗов, Геология и разведка, 1981, № 6, 87-94.

8. Викентьев В.А. Воронцов В.А., Кушнарев П.И., Ясковский П.П. Оценка степени разведанности прерывистого оруденения (статья 2). Изв. ВУЗов, Геология и разведка, 1981, № 10, 84-90.

9. Будрик В.Г., Кушнарев П.И. Петров В.И. Количественное изучение рудных образований и факторов рудоконтроля. Изв. ВУЗов, Геология и разведка, 1982, № 8, С91-98.

10. Викентьев В.А. Воронцов В.А., Кушнарев П.И., Ясковский П.П. Оконтуривание прерывистого оруденения при подсчете запасов месторождений. Изв. ВУЗов, Геология и разведка, 1982, № 7, 83-88.

11. Кушнарев П.И. Обоснование рационального объема проб при разведке россыпных месторождений. Известия ВУЗов, Геология и разведка, 1984 №9 С. 72-77.

12. Демченко Н.Н., Маркевич В.Ю., Кушнарев А.П., Кушнарев П.И. Блочное моделирование запасов Наталкинского

золоторудного месторождения и проектирование оптимального карьера. Руды и металлы, № 2, 2006 г. С. 29-36.

13.Воропаев В.И., Кушнарв П.И. Ежов А.И. Проблемы использования блочного моделирования в отечественной практике подсчета запасов. Недропользование XXI век, № 3, 2007, С. 15-21.

14.Жидков С.Н., Бабина Т.О., Кушнарв П.И., Маркова Н.С. Об использовании компьютерного моделирования при подсчете запасов. Недропользование XXI век, № 6, 2007, С. 30-33.

15.Воропаев В.И., Ежов А.И., Кушнарв П.И. Разведанность и классификация запасов; нерешенные проблемы. Недропользование XXI век, № 6, 2009, С. 23-28.

16.Будрик В.Г., Гуськов О.И., Ежов А.И., Кушнарв П.И., Маркевич В.Ю., Применение методов геостатистики и горно-геологических информационных технологий при госэкспертизе запасов рудных месторождений; проблемы и решения. Недропользование XXI век, № 1, 2010, С. 37-43.

17.Григоров С.А., Кушнарв П.И. Геохимическая разведка. Недропользование XXI век, № 5, 2010, С. 26-33.

18.Кушнарв П.И., Градовский И.И. Приемы блочного моделирования при разработке ТЭО кондиций. Недропользование XXI век, № 1, 2014. С. 43-49.

19.Бабина Т.О. Кушнарв П.И. Влияние точности анализов на оконтуривание оруденения Недропользование XXI век, № 6, 2015, С. 84-89.

20.Кушнарв П.И. Методическое обеспечение условий блочного моделирования в стандартах ГКЗ РФ. Геология и охрана недр, Алматы, «КазГео», №2(51) 2015, С. 39-43

21.Кушнарв П.И. Современные способы подсчета запасов и геолого-экономической оценки месторождений твердых полезных ископаемых. Разведка и охрана недр, № 2, 2018, С. 23-28.

22.Кушнарв П.И., Анненкова Т.Е., Иванов С.Н., Казанов О.В. Новая Классификация запасов и прогнозных ресурсов ТПИ и Положение о стадийности ГРР: проблемы, связанные введением их в действие. Недропользование XXI век, №2 (71), 2019, С. 106-112.

23.Иванов С.Н., Кушнарв П.И. Оценка разведанности запасов твердых полезных ископаемых. Недропользование XXI век, №2 (71), 2019, С. 82-92.

24.Кушнарв П.И. Обоснование геометрии разведочной сети и квалификация запасов (на примере золоторудных

месторождений) Недропользование XXI век, №5 (74), 2019. С. 39-47.

25. Кушнарев П.И., Сытенков В.Н., Чичерина А.Г. Применение методов фрактальной геометрии для оценки потерь и разубоживания при разработке месторождений сложного строения. Рациональное освоение недр, № 5, 2020, С. 64-72.

26. Иванов С.Н. Кушнарев П.И. Фрактальная геометрия при решении задач разведки и оценки месторождений твердых полезных ископаемых. Разведка и охрана недр, № 7, 2021 С. 38-44.

27. Кушнарев П.И. Анализ погрешностей оценки запасов золоторудных месторождений. Разведка и охрана недр, №4, 2021 С. 49-55.

28. Кушнарев П.И. Лазарев А.Б. Объекты оценки сложности геологического строения месторождений твердых полезных ископаемых. Разведка и охрана недр, № 9, 2021, С 52-57.

Другие публикации:

1. Кушнарев П.И. Анализ причин ошибок в оконтуривании рудных залежей и тел золоторудных месторождений. Золото и технологии, №2, 2012. С. 69-77.

2. Кушнарев П.И. Интерпретация результатов разрежения разведочной сети. Золото и технологии, №1, 2013, С. 82-88

3. Кушнарев П.И. Скрытые потери и разубоживание. Золото и технологии, №3, 2017, С. 82-86.

4. Кушнарев П.И. Анализ прирезок при повариантном подсчете запасов золоторудного месторождения. Золото и технологии, № 4, 2019. С.76-80.