



МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

«Уральский государственный горный университет»  
(ФГБОУ ВПО «УГГУ»)

Куйбышева ул., д.30, г. Екатеринбург, 620144, Тел./ факс:(343) 257-25-47/ 251-48-38

E-Mail: office@ursmu.ru, <http://www.ursmu.ru>

ОКПО 02069237, ОГРН 1036603993777, ИНН/КПП 6661001004/667101001

## ОТЗЫВ

### официального оппонента

на диссертацию *Кушнарёва Петра Ивановича* на тему «*Научно-методические основы количественной оценки разведанности золоторудных месторождений*», представленную на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 1.6.10 – «*Геология, поиски и разведка месторождений твердых полезных ископаемых, минерагения*».

Рецензируемая работа подводит итог многолетних геологических исследований автора на крупных золоторудных месторождениях России и ближнего зарубежья и полностью соответствует намеченной специальности.

Актуальность темы диссертации не вызывает сомнения и определяется отсутствием единообразных подходов к оценке разведанности запасов/ресурсов месторождений на количественной основе. Сегодня необходима разработка однозначных количественных критериев оценки разведанности запасов/ресурсов. Их отсутствие зачастую становится «краеугольным» камнем при составлении отечественных и зарубежных классификаций, что естественно увеличивает риски при принятии технических и финансовых решений в процессе реализации геологических и горных проектов. Эта проблема тесно связана с обоснованием разведочной сети и классификацией запасов по объектам и блокам. Не менее ценным в работе П. И. Кушнарёва является присутствие важных системообразующих «элементов»: в ней полно освещаются учебно-методические (образовательные), исследовательские (научные), а главное, - прикладные (производственные) вопросы, что находится в русле «Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской

Федерации до 2035 года», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 декабря 2018 г. № 2914-р, где в числе основных вызовов и угроз развитию минерально-сырьевой базы Российской Федерации обозначен разрыв связей в системе «образование – наука – производство».

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

Для достижения поставленной цели автору пришлось решать ряд конкретных взаимосвязанных задач. В их числе: провести анализ требований к изученности месторождений в отечественной и зарубежной практике ведения ГРР; исследовать свойства оруденения на месторождениях различных морфологических типов; определить количественные показатели при оценке сложности природных объектов; дать анализ методов обоснования геометрии разведочных сетей и типизацию золоторудных месторождений для целей разведки, а также решать другие вопросы. Методы исследования диссертанта включали: обобщение данных публичной отчетности, отечественной и зарубежной литературы; статистический анализ данных; геостатистическое и блочное моделирование; графический анализ морфологии рудных образований с определением ошибок геометризации; выполнение расчетов на основе разработанных алгоритмов.

Научную новизну и теоретическую значимость представляют ряд положений. Отметим некоторые из них: сделан выбор признаков, характеризующих на количественной основе сложность геологического строения; определены показатели при описании морфологии рудных тел; установлены аналитические выражения, описывающие взаимосвязь показателей с ошибками геометризации и шагом разведочной сети; исследованы возможности и условия применения способов оценки изменчивости содержаний; обоснованы приемы аналитического расчета параметров разведочной сети при разных требованиях к точности оценки средних содержаний для запасов определенных категорий; разработаны

способы оценки ошибок геометризации при отсутствии участков детализации; выявлены критерии разведанности запасов, определена их связь с параметрами разведочной сети; установлены предельные значения критериев разведанности для запасов разных категорий.

Объектами исследований явились многочисленные золоторудные месторождения Сибири, Дальнего Востока, отчасти Урала. Однако, систематизация этих объектов на рудно-формационной основе для целей разведки в диссертации не приводится. В то же время есть основания полагать, что разработка методов количественной оценки разведанных запасов для отдельных геолого-промышленных (рудно-формационных) типов, имеющих разную морфологию рудных тел, продуктивность залежей и сложность геологического строения, будет иметь свою специфику.

В диссертации определена теоретическая и практическая значимость работы. Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждены фактическими материалами и конкретными примерами использования предлагаемых подходов к обоснованию разведочной сети и квалификации запасов, а также апробаций их на Международных и Всероссийских форумах, семинарах и Геовебинарах. Основные результаты исследований автора отражены в статьях изданий, рекомендованных ВАК (28 работ).

Практическое значение работы заключается в разработке ряда аспектов оценки разведанности месторождений золота. В их числе: даны рекомендации по оценке фрактальной размерности объектов, по определению морфологических характеристик оруденения; предложена типизация золоторудных месторождений на основе ряда характеристик и показателей; разработана процедура расчета параметров разведочной сети и рекомендации по разряжению сети; сформированы предложения по оценке потерь и разубоживания с учетом сложности строения объектов. Разработки соискателя дают возможность на количественной основе проводить сопоставление

категорий запасов/ресурсов, выделяемых в разных стандартах, что обеспечивает гармонизацию подходов к оценке месторождений.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Ее общий объем составляет 212 страниц машинописного текста, содержит: 88 иллюстраций, 36 таблиц и список литературы из 86 наименований.

В диссертации вынесены на защиту 4 научных положения, которые сформулированы несколько пространно, растянуто, что затрудняет их восприятие.

Первое положение посвящено оценке (характеру) сложности геологического строения золоторудных объектов на количественной основе, которая предполагает анализ трех признаков – масштаба месторождения, морфологии оруденения и изменчивости содержаний в пробах равной длины или композитах.

В работе приводится анализ существующих подходов к определению группы сложности рудных объектов; методика их изложения в Методических рекомендациях ГКЗ по применению классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов. Определение группы сложности месторождений сейчас базируется на качественной «относительной» основе с применением количественных показателей – коэффициентов рудоносности, сложности формы рудных тел, вариации мощности и содержания ценного компонента. Автор в работе наглядно продемонстрировал несостоятельность применяющейся методики определения группы сложности к рудным объектам, приуроченным к минерализованным зонам и штокверкам, доля которых в структуре МСБ РФ имеет тенденцию к увеличению.

Предлагаемая методика определения группы сложности золоторудных объектов в определенной степени является традиционной. Особый интерес представляет характеристика методов фрактальной геометрии, которые ранее практически не применялись в данной области исследований.

Второе положение касается параметров разведочной сети, которые должны обеспечивать достижение заданной точности оценки запасов и

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 с учетом числа наблюдений/проб в изучаемом рудном объеме. Оценку ошибок геометризации, особенно на ранних стадиях геологоразведочных работ, предлагается проводить с применением аналитических выражений, использующих данные геостатистического анализа и показатели фрактальной размерности объектов.

Автором сделан «шаг вперед» в части реализации пункта 1б «Классификации запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых», утвержденной Приказом МПР России от 11.12.2006 № 278, - «При квалификации запасов полезных ископаемых по категориям в качестве дополнительного классификационного показателя должны использоваться количественные и вероятностные оценки точности и достоверности определения основных подсчетных параметров».

Третье положение. Проведенными исследованиями впервые установлено, что фактический уровень относительных стандартных погрешностей оценки содержаний для категории  $C_1$  применительно к блокам, сопоставимым с объемами годовой производительности, 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  $C_1$  составляет 30-50%, что соответствует их уровню для других типов месторождений. Эти лимиты предлагается принять для количественной оценки разведанности запасов данной категории.

Выводы получены эмперическим путем и базируются на огромном практическом опыте диссертанта. Необходимо распространить подобные подходы и на другие виды твердых полезных ископаемых.

Четвертое положение. 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.

Обоснование сформулированных выше научных положений раскрывается в шести главах работы. Остановимся на их содержании.

**Глава 1** посвящена рассмотрению принципов оценки изученности и квалификации запасов. Отмечено, что в работе рассматриваются различные аспекты изучения и оценки золоторудных месторождений. Наиболее важными для экономической оценки месторождений оказываются сведения о качестве и количестве руд, которые и реализуются в запасах. Ведущим признаком оруденения, определяемом в массовом порядке в пробах, является содержание полезного компонента. Другие характеристики месторождения (размеры рудных тел, их продуктивность, морфология) рассматриваются как производные по отношению к оценке содержаний.

Ведущие страны-производители минерального сырья в настоящее время входят в организацию GRIRSCO. Россия также является членом этой организации. Основные положения отечественной квалификации соответствуют Австралийскому Кодексу JORC. Однако при гармонизации отечественных и зарубежных стандартов отчетности возникают значительные трудности, касающиеся как разных принципов и подходов при их реализации, так и терминологии. Количественные показатели разведанности в зарубежных и российских стандартах однозначно пока не установлены. Попытки преодолеть противоречия и найти единообразие оценки разведанности запасов в тех и других стандартах изложены в диссертационной работе.

Глава 2 рассматривает вопросы изучения свойств рудных объектов. Отмечено, что основными свойствами скоплений твердых полезных ископаемых, определяющих их разведанность, являются морфология рудных залежей и изменчивость геологоразведочных параметров. Среди методов, используемых для их описания, наибольший интерес представляют подходы, позволяющие определять количественные характеристики.

Отмечается, что **морфология рудных тел** – наиболее проблемная составляющая при исследовании формы залежей. Её основные характеристики зависят от типа рудоконтролирующих факторов, применяемых кондиционных показателей, параметров сети наблюдений. Возможности выявления формы рудных тел определяются плотностью и геометрией сети наблюдений. В качестве «истинной» принято рассматривать форму, устанавливаемую при проведении эксплуатационных работ. При редкой сети наблюдений форма оказывается всегда более простой, чем истинная.

Для согласования истинных и разведочных размеров рудных тел требуется введение поправок, учитывающих параметры исходной и предельно плотной сети. Определяющее значение приобретает в этом случае **изучение изменчивости** геологоразведочных параметров, в том числе содержания полезных ископаемых, рассматриваются как случайные (взаимно независимые) и как величины, связанные с их положением в пространстве. В первом случае инструментом их изучения является аппарат математической статистики, а во втором – методы геостатистики.

В диссертации отдано предпочтение обобщению данных по золоторудным месторождениям штокверкового типа, применительно к которым вероятностно-статистическая модель наиболее приемлема. Здесь же рассмотрено использование положений фрактальной геометрии для решения задач разведки месторождений. Известно, что «фрактальная размерность» – это один из способов определения размерности множества в метрическом пространстве. Размерность фрактальную ( $D$ ) предложено определять с использованием показателя Хаусдорфа. Ранее этот показатель для целей

разведки и ГЭО не применялся. Исходными данными для определения размерности  $D$  являются разрезы, планы, проекции, где установлена форма залежей по предельно плотной сети сопровождающей эксплуатационной разведки, что ограничивает возможности использования этого показателя. При изложении материала отмечены возможности использования «самоподобия» рудных образований, когда морфологические особенности минерализованных зон, рудных залежей и рудных тел в известной степени повторяют друг друга. Это обстоятельство позволяет прогнозировать основные черты морфологии оруденелых пород уже на ранних стадиях изучения территорий.

**Глава 3** посвящена вопросам оценки сложности геологического строения природных объектов. Существующая в настоящее время практика оценки сложности объектов зарекомендовала себя как инструмент определения методики изучения рудных объектов и выбора параметров разведочной сети. Однако основные положения этой группировки разработаны уже давно, в настоящее время требуют корректировки. Предлагается основными классификационными признаками при группировке месторождений для целей разведки рассматривать: масштаб объекта и производительность предприятия; морфологический тип оруденения; фрактальную размерность  $D$  (меру Хаусдорфа); изменчивость содержаний полезного компонента, характеризуемого по пробам равной длины или по композитам.

Новым подходом при рассмотрении затронутого вопроса является обоснование следующих показателей: масштаб оруденения увязывается с будущей годовой производительностью горнодобывающего предприятия; по величине фрактальной размерности предлагается разделять жилы простого и сложного строения; по величине коэффициента вариации степень изменчивости содержаний предлагается условно разделять на низкую, среднюю, высокую и весьма высокую.

Условием отнесения месторождения к определенной группы сложности по существующему в настоящее время положению являются сведения по морфологии и изменчивости параметров большей части запасов (более 70 %). В



рамках предлагаемого подхода рекомендуется «упрощенный» вариант, предусматривающий решение задач оценки уже для конкретных частей объекта. Эти части месторождения будут отличаться также и условиями отработки. В этом случае необходимо гибкое изменение параметров разведочной сети в разных частях объекта применительно к заданной категории запасов.

Подводя итог изложенному материалу, есть основания считать, что главы 2 и 3 в полной мере раскрывают и доказывают содержание 1-го защищаемого научного положения.

**Глава 4** содержит характеристику методов обоснования разведочной сети. Известно, что геометрия разведочной сети выбирается с учетом свойств полезного ископаемого и необходимой детальности изучения оруденения. Последнее отражается в категориях запасов.

Ранее отмечалось, что к основным факторам, определяющим изученность запасов, отнесены свойства объекта – изменчивость параметров, морфология рудных образований. Детальность характеристик этих свойств раскрывается через плотность разведочной сети или площадь рудного тела, приходящаяся на одно разведочное пересечение.

Совокупное влияние каждого из факторов предлагается выразить в виде числовых показателей – *критериев разведанности*. В их объеме предложено рассматривать **точность оценки параметров** (доверительный интервал) и **ошибки геометризации** (ошибки в определении пространственного положения рудных тел).

Опираясь на эти понятия, в работе рассмотрен перечень подходов к обоснованию плотности разведочной сети, принятый в отечественной практике. При решении этой задачи используются как качественные, так и количественные подходы. **Качественный подход** базируется на методе аналогии. **Количественный подход** базируется на использовании критериев разведанности – погрешностей (или точности оценки запасов), а также определении ошибок геометризации (погрешностей пространственного

положения рудных тел). Далее в работе изложены представления диссертанта, обосновывающие необходимость использования этих параметров при выборе разведочной сети.

Для обоснования геометрии сети на основе характеризуемого метода требуется определить необходимое число наблюдений ( $N$ ) с учетом требуемой точности ( $t_a$  - критерий Стьюдента), а затем отнести полученные данные к определенному объему недр. В связи с большой неопределенностью целого ряда условий в этих расчетах, а также отсутствием установленных требований к точности оценки параметров, использование данных критерия на практике не представлено сколько-нибудь значимо. При оценке ошибок геометризации контуров рудных тел для обоснования разведочной сети задействуют аналитические и экспериментальные исследования.

В диссертации отмечено, что в зарубежных стандартах теоретические вопросы обоснования параметров разведочной сети практически не рассматриваются. В них часто делается акцент на опережающее создание участков детализации, анализ результатов по которым используется для корректировки параметров разведочной сети.

В завершающей части данного раздела диссертантом сформулированы предложения по совершенствованию приемов обоснования параметров разведочной сети. Разработанная концепция базируется на количественных критериях оценки разведанности с использованием положения теории фракталов. В целом глава 4 раскрывает и обосновывает существо 2-го защищаемого положения.

**Глава 5** рассматривает критерии разведанности и допустимые значения погрешностей для отдельных категорий запасов. Основными критериями разведанности являются: погрешности оценки геологоразведочных параметров, ошибки геометризации рудных тел. Предельные значения этих показателей для запасов различных категорий в настоящее время однозначно не установлены.

С целью обоснования этих показателей были проведены исследования по определению их фактических величин на уже разведанных месторождениях,

запасы которых прошли апробацию в ГКЗ. На основе предложенного соискателем алгоритма были изучены погрешности оценки запасов, а также величины ошибок геометризации применительно к категории  $C_1$ , которая рассматривается как базовая для объектов разного масштаба.

Было впервые установлено, что фактические погрешности оценки содержаний золота обнаруживают тенденцию увеличения от крупных и уникальных месторождений к мелким; в среднем, их значения составили 9.7, 10.8 и 18.3 % соответственно. Аналогичные расчеты были проведены на зарубежных золоторудных объектах для ресурсов категории indicated.

Установленные в результате проведенных исследований уровни фактических относительных погрешностей оценки средних содержаний, примененные к объему недр, соответствующему годовой производительности предприятия, предлагается принять за основу в качестве допустимых/предельных для запасов категории  $C_1$ . Для других категорий эти показатели увеличиваются (кат.  $C_2$ ) или уменьшаются (кат. В) вдвое.

На обрабатываемых золоторудных месторождениях по блокам с утвержденными запасами категории  $C_1$  эмпирическими методами были исследованы фактические величины ошибок геометризации. Установлено, что в сечениях их величина изменяется 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.

Требования к погрешности оценки содержаний рассмотрены автором с позиции экономических рисков освоения месторождений. Отмечается, что предельно допустимые ошибки могут корректироваться с учетом экономических показателей работы предприятия.

Основное содержание 5-ой главы составляет сущность 3-го защищаемого научного положения.

**Глава 6** посвящена рассмотрению основных положений квалификации запасов/ресурсов в отечественной и зарубежной практике оценки месторождений. Если в отечественной практике оценка разведанности отдельных подсчетных блоков традиционно осуществляется на качественном уровне методом экспертных оценок, то в зарубежной практике для количественной квалификации запасов/ресурсов основное значение придается вариограммам, по которым определяются радиусы корреляции.

Предлагаемая автором таблица отражает квалификацию запасов в отдельных блоках одного из месторождений. Она составлена на количественной основе. Базируется на анализе изменчивости содержаний и определении погрешностей их оценки с учетом числа наблюдений в конкретных блоках. В значения погрешностей вводят поправки, учитывающие несоответствие запасов в блоке запасам в объеме, сопоставимом с годовой производительностью предприятия. В ряде случаев для более уверенной квалификации запасов в блоках возможно определение величины ошибок геометризации.

Для подтверждения эффективности предложенной процедуры выполнен анализ квалификации на примере конкретного месторождения (Намдими, Гана). Проведено сравнение квалификаций запасов, полученных в различных стандартах. Установлено, что предлагаемый подход не противоречит результатам квалификации запасов на качественной основе; в то же время он позволяет уточнить ее оценку для отдельных участков и блоков.

Содержание главы 6 раскрывает сущность 4-го научного защищаемого положения.

**В заключении** диссертационной работы её автор отмечает, что в диссертации предложена целостная концепция оценки разведанности запасов на основе количественных показателей. Решение сформулированной в работе задачи опирается на выявление взаимосвязи свойств природных объектов с параметрами разведочной сети и критериями, определяющими возможность отнесения запасов по отдельным блокам к той или иной категории.

Совокупное влияние морфологических свойств и показателей изменчивости объектов отражается в группировке месторождений по сложности геологического строения. Для решения этой задачи предложено использовать масштаб оруденения, морфологический тип и фрактальную размерность. На основе проведенных исследований разработаны оригинальные приемы определения параметров разведочной сети. Разобраны и другие актуальные проблемы разведочного дела.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.**

Считаем целесообразным продолжить работу по дальнейшему совершенствованию методики разведки месторождений твердых полезных ископаемых. В частности, предложенные подходы могут использоваться для решения вопросов инвестиционной привлекательности объектов, финансирования предприятий и т.п.

Не все предлагаемые автором построения, обоснования и принятые концепции бесспорны. Но, безусловно, то, что они актуальны и требуют дальнейшего развития, корректировки, апробации.

В целом, представленная работа является завершенным научным трудом, вносящим значительный вклад в развитие методов изучения и геолого-экономической оценки месторождений твердых полезных ископаемых, в том числе золоторудных объектов. Она решает также вопросы гармонизации отечественных отчетов о запасах/ресурсах со стандартами международной отчетности. Представляется, что положения работы, в целях их практического использования, должны найти отражение в методических документах ГКЗ.

### **Замечания.**

К недостаткам (замечаниям) следует отметить следующее:

1. В тексте следовало бы более подробно охарактеризовать геологическое строение и свойства золоторудных объектов, являющиеся наиболее представительными для основных морфологических типов.

2. Предложено разделять жильные образования на два типа – простого и сложного строения. Вместе с тем, признаки для такого разделения, позволяющие проводить его на ранних стадиях геологоразведочных работ, не охарактеризованы.

3. Остался не освещенным в диссертации вопрос использования фракталов для уточнения величин эксплуатационных потерь и разубоживания в условиях ограниченности исходной геологической информации, что немаловажно в преддверии принятия новой Классификации запасов. Как известно ее «новшеством» являются извлекаемые запасы, при расчете которых учитываются характеристики извлечения полезного ископаемого из недр.

#### **Выводы.**

Автор выполнил цикл исследований, получил новые научные результаты, которые можно рассматривать как заверченный научный труд, соответствующий уровню докторской диссертации.

Сделанные замечания не уменьшают значимость полученных автором научных результатов, которые следует рассматривать как один из возможных вариантов в решении важной проблемы совершенствования научно-методических основ оценки разведанности золоторудных месторождений.

В целом диссертационная работа **Кушнарёва Петра Ивановича** является законченным научным исследованием, посвященным разработке научно-методических основ количественной оценки разведанности золоторудных месторождений.

Основные положения диссертации отражены в 28 статьях изданий, рекомендованных ВАК, и апробированы на Международных и Всероссийских форумах, семинарах и Геовебинарах.

Содержание автореферата в полной мере раскрывает содержание диссертации.

Считаю, что рассматриваемая диссертация соответствует всем требованиям ВАК к диссертациям на соискание ученой степени **доктора геолого-минералогических наук** по специальности 1.6.10. «Геология, поиски

и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения», а её автор **Кушнарёв Петр Иванович**, заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Официальный оппонент – Душин Владимир Александрович  
доктор геолого-минералогических наук (специальность: 04.00.08 – минералогия, петрография и вулканология; 04.00.11 – геология, поиски и разведка рудных и нерудных месторождений, металлогения),  
профессор по кафедре месторождений полезных ископаемых,  
заведующий кафедрой геологии, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых.

Факультет геологии и геофизики, кафедра геологии, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет».

620144, Уральский федеральный округ, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, д.30

Интернет сайт организации: [ursmu.ru](http://ursmu.ru)

E-mail: [fgg.gpr@m.ursmu.ru](mailto:fgg.gpr@m.ursmu.ru)

Тел. 8-(343)-251-49-90

 Душин Владимир Александрович

Я, Душин Владимир Александрович, даю согласие на автоматизированную обработку персональных данных.

Подпись В. А. Душина автора отзыва заверяю

Начальник отдела кадров ФГБОУ ВО «УГГУ»



Т. Б. Сабанова

