НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ им. М.М. АДЫШЕВА
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ

На правах рукописи
УДК 555.8 (075.8)

Абзалов Марат Зайнутдинович

СОВРЕМЕННЫЕ ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ И МЕТОДОЛОГИЯ ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ ПРИ ОСВОЕНИИ ГОРНО-РУДНЫХ ПРОЕКТОВ И ИХ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

(ПРИКЛАДНАЯ РУДНИЧНАЯ ГЕОЛОГИЯ)

25.00.11- геология, поиски и разведка
месторождений твердых полезных ископаемых, минерагения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Бишкек - 2022

Работа выполнена в лаборатории минерагении и рудообразования Института геологии Национальной Академии наук им. М.М. Адышева

Научный консультант Доктор геолого–минералогических наук, профессор, академик НАН КР Дженчураева, Розалия Джаманкуловна

Официальные оппоненты: Ужкенов Булат Султанович, доктор геолого-минералогических наук, Президент ОО «Академия минеральных ресурсов РК»

Шумилин Михаил Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, почетный академик РАЕН

Карабаев Маматхан Садирович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Университет геологических наук, Республика Узбекистан

Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского (ВИМС). 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 31.

Защита состоится «5» апреля 2022 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 25.20.612 при Институте Геологии им. А.А. Адышева Национальной Академии Наук Кыргызской Республики по адресу: 720040, г. Бишкек, бульвар Эркиндик 30, актовый зал, 2 этаж.
Доступ в bbbwebinar: **https://vc1.vak.kg/b/252-3gm-8di-zcc**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Института Геологии им. А.А. Адышева НАН КР, по адресу: 720040, г. Бишкек, бул. Эркиндик 30 и Института сейсмологии НАН КР, по адресу: 720060, г. Бишкек, микрорайон Асанбай 52/1, а также на сайте ВАК КР: www.vak.kg.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат географических наук, доцент Э.Т. Токторалиев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Одной из основных задач горнорудных проектов является объективная оценка промышленных запасов минерального сырья для последующей эффективной эксплуатации месторождений.

Актуальность темы исследования. Горнодобывающая отрасль на данном этапе развития мировой экономики вступила в стадию, требующей модернизации организационных подходов геологоразведочных работ и обновления методической базы, поскольку в практике горно-геологической индустрии за последние десятилетия произошли существенные изменения, такие как:

– значительное удорожание геологоразведочных работ в связи с необходимостью разведки объектов на больших глубинах и зачастую расположенных в удаленных труднодоступных регионах;

– интенсивная глобализация сырьевых рынков, приведшая к возросшей в мире конкуренции;

– доступность компьютерных технологий, позволяющих оперативно обрабатывать большие объёмы данных и моделировать 3-х мерные пространственные переменные.

– наличие различных нормативно-правовых систем оценок сырьевых ресурсов (JORC Code, NI 43-101 и др.), имеющих существенные различия в подходах и, главное и в определении категории запасов;

Существующая острая необходимость в модернизации методических подходов горнодобывающих компаний для скорейшего создания новой методологической базы предопределила формирование новой методики подсчета запасов на базе нелинейной геостатистики. Она позволит выбирать по объективным критериям оптимальные схемы геологоразведочных работ, количественно оценивать риски, выбирать оптимальные буровые сети и схемы опробования рудных тел и на этой основе классифицировать разведанные запасы. Эти вопросы освещены в монографии и цикле статей автора положенных в основу диссертации и являются одинаково актуальными и для государственных компаний и для транснациональных корпораций.

Цель работы. Основная цель исследования – создание новой системы математических методов для сбора и обработки геологоразведочных данных. Методологической основой этой системы стали методы нелинейной геостатистики и стохастические (вероятностные) модели.

Объектом исследований явились месторождения полиметаллов, железных руд, меди, золота, никеля, урана, бокситов, минеральных песков и алмазов.

Предмет исследований – георискі в горнодобывающей индустрии, непосредственно зависящие от достоверной оценки сырьевых ресурсов.

Основные задачи исследования. Исследования автора сосредоточились на методических разработках по оптимизации геологоразведочных работ при освоении рудных объектов и на действующих рудниках. Фундаментальной задачей работ автора было создание комплексной методики оценки и классификации запасов месторождения. Методика оценки должна учитывать селективность отработки месторождения и одновременно оценивать технические и экономические рисков.

Данное исследование проводилось по нескольким направлениям:

1. Разработка методов контроля качества опробования, позволяющего выбирать оптимальные схемы пробоподготовки для разведуемого месторождения. Данное направление также включает работы автора по оценке представительности крупно-объемной технологической пробы;
2. Разработка вероятностных моделей для оконтуривания рудных тел в 3-х мерном пространстве;
3. Создание новой методики подсчета запасов на базе нелинейной геостатистики. Метод, разработанный автором, получил название LUC (Localised Uniform Conditioning);
4. Разработка методов классификации запасов. Предложенная автором система рассчитывает риски с учетом схемы отработки месторождения и нормы прибыли. Этот метод предложен для применения в единой международной системе классификации запасов.

Фактический материал. В основу работы положены материалы, собранные автором на действующих рудниках в течение 1988 – 2019 годов. Это несколько десятков проектов на пяти континентах, которые охватывают различные типы месторождений и виды сырья включая крупнейшие месторождения полиметаллов (Олимпик Дам), железных руд (Пилбара), меди (Эскондида), золота (Витватерсранд), никеля (Персеверанс), урана (Россинг), бокситов (Сангареди), минеральных песков (Ричардс Бей) и алмазов (Аргайл). Объем обработанных и проанализированных данных включает сотни тысячи анализов, десятки километров горных выработок, значительные объемы производственных данных.

Методы исследований. В работе использовались современные математические методы и приемы компьютерного моделирования: включая методы нелинейной и непараметрической геостатистики; стохастические модели пространственных переменных, а также собственные разработки автора.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. При широких буровых сетях с большими расстояниями между разведочными скважинами, классические статистические методы не приемлемы для оценок распределения полезного компонента в блоках. Автор разработал метод LUC (Localised Uniform Conditioning), позволяющий, используя математический аппарат нелинейной геостатистики, рассчитывать

распределение полезного компонента в небольшие блоки не нарушая статистических отношений между дисперсией изучаемой переменной и размером блоков (по геостатистическому принципу «volume-variance relationship»).

2. Предложенный параметр CV% является универсальной мерой оценки качества опробования, позволяющий оценить и сопоставить влияние геологических факторов и техники опробования на воспроизводимость результатов проб и на этой основе выбрать оптимальные соотношения между сетью опробования и методикой пробоподготовки.

3. Предложенная геостатистическая методика оконтуривания рудных тел в 3-х мерном пространстве использует индикаторные вариограммы для построения вероятностных 3-х мерных моделей.

4. Предложена новая методика классификации запасов, основанная на вероятностной оценке допустимого риска. За допустимую ошибку принимается разница между подсчитанным средним содержанием полезного компонента и экономически минимально допустимым его содержанием. Вероятность ошибки рассчитывается используя стохастические методы геостатистики.

5. Автором разработаны новые критерии оценки пригодности крупно-объемных проб для технологических испытаний. По новой методике необходимо оценить статистические параметры распределения полезных компонентов и вредных примесей в руде которые далее воспроизводятся в технологической пробе. Статистический анализ пробы необходимо проводить с учетом соотношения «дисперсия – объем» (volume-variance relationships). При отборе технологической пробы также учитывается пространственное распределение отобранных проб. Крупно-объемная проба считается представительной и пригодна для технологических испытаний если она удовлетворяет двум вышеобозначенным критериям.

Научная новизна работы. Основные результаты исследований, выносимые автором на защиту, представляют новые разработки и ранее не были известны.

Впервые было показано, что с помощью метода LUC можно рассчитывать распределение запасов по небольшим селективно отрабатываемым блокам, размер которых слишком мал в сравнении с буровой сетью, что не позволяет применять классические методы оценок.

Автор одним из первых предложил методику оконтуривания рудных тел в 3-х мерном пространстве используя вероятностную оценку геостатистических индикаторов;

Новой разработкой является критерий CV%, который, как впервые было показано автором, может использоваться для количественного сопоставления геологических и лабораторных (в области пробоподготовки) факторов.

В настоящее время отсутствует единая система количественных критериев классификации запасов, и предложенная автором процедура является новым шагом в этом направлении. Впервые было предложено оценивать допустимый

уровень погрешности подсчета запасов по месторождению относительно нормы прибыли.

Разработанные автором критерии отбора крупно-объемных проб позволяют более точно оценить представительность пробы для технологических испытаний.

Новаторскими являются также другие работы автора, изложенные в его монографии (Abzalov, M.Z. Applied Mining Geology. Modern Approaches in Solid Earth Sciences 12 / M.Z.Abzalov. - Berlin: Springer, 2016. 448 p.).

Практическое значимость работы. Основная часть разработанных автором методов уже применяется международными горнодобывающими компаниями. В частности, метод LUC добавлен в специализированную компьютерную программу “Isatis”, разрабатываемую французской компанией Geovariances и используемой во всем мире.

Метод расчетов качества опробования, используя параметр CV%, в короткие сроки нашел широкое применение в горной индустрии Австралии и за ее пределами.

Ряд новых разработок автора в данный момент находятся в стадии внедрения. Предложенная методология классификации запасов позволяет объективно оценивать и переводить запасы, подсчитанные по принципам ГКЗ (C_1, C_2 и др.), в международные категории, например, JORC Code и др. В частности, эта методология, была успешно применена для освоения запасов уранового месторождения в Иордании, куда автор был приглашен правительством этой страны в качестве консультанта.

Экономическая значимость полученных результатов. Система методов автора позволяет объективно оценивать риски горных проектов и сократить затраты на геологоразведочные работы за счет оптимизации буровой сети и методики опробования проектов.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований автора в полной мере отражены в публикациях. Основные положения, выносимые на защиту, также неоднократно докладывались на международных конференциях, включая международные геологические конгрессы ЮАР (2016) и Австралия (2012), международные конференции по теории и практике опробования месторождений проводимые в Чили (2011) и Перу (2013), на международных конференциях рудничных геологов (2009 и 2017) в Австралия, и многочисленных конференциях, организуемых Австралийским Институтом горного дела и металлургии (AusIMM). В 2016 году работы автора по данной проблеме были изданы отдельной монографией, опубликованной в ведущем международном издательстве научных работ “Springer” (Abzalov, M.Z. Applied Mining Geology. Modern Approaches in Solid Earth Sciences 12 / M.Z.Abzalov. - Berlin: Springer, 2016. 448p**).** В 2017 году эта авторская работа премирована журналом ‘Choice’ как Выдающаяся Научная Работа (“Outstanding Academic Title”).

В целом, автором опубликовано более 80 научных работ из них более 50 непосредственно по теме диссертации. Научные работы публиковались в ведущих мировых научных журналах, включая такие издания: Mathematical Geology, Economic Geology, Exploration and Mining Geology, Applied Earth Science, The Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, Lithos, Mineralogy and Petrology, а также в трудах международных конференций и симпозиумов.

М.Абзалов в 2015 году был награжден Южно-Африканским горным обществом золотой медалью Дэни Криже (Dani Krige's Gold Medal).

Структура и объем диссертации. В основу диссертации легли публикации в виде статей (более 40) и монография (объемом 448 страниц, включающая 265 диаграмм). Публикации несут дополнительную информацию, касающуюся непосредственно темы диссертации и опубликованы в рейтинговых международных журналах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе «Обзор литературы и текущее состояние проблемы» описано развитие рудничной геология и ее становление как самостоятельной области современной прикладной геологии. Показано, что рудничная геология является основой для технико-экономической оценки горнорудных проектов и обеспечивает эффективную эксплуатацию рудников.

Системные научные исследования и методические разработки в этой области стали проводится примерно с середины 1960-х. В это десятилетие сформировались новые научно-прикладные направления, заложившие основу современной рудничной геологии:

─ Геостатистика и геостатистические методы моделирования месторождений и оценки запасов (Матерон, 1968; David, 1977; Journel and Huijbregts, 1978). Эти работы заложили основу современных методов подсчета запасов. Тем не менее, последующее применение предложенных методов в горной индустрии выявила их ограничения и недостатки, наиболее существенной из которых была невозможность получения точных оценок линейными математическими методами для небольших блоков. Новый цикл исследований и разработок начинается в конце 1990-х, когда доступность компьютерных технологий позволили разрабатывать и внедрять методы нелинейной геостатистики и стохастические алгоритмы. В 2006 году автором была предложена новая методика подсчета запасов LUC (Localised Uniform Conditioning). Новый метод позволил преодолеть ограничения традиционно используемых методов и в настоящее время успешно внедрен в горную индустрию, где активно используется для технико-экономических оценок горнорудных проектов.

─ Опубликованная монография (P.Gy «Sampling of particulate materials, theory and practice» 1979) стала основой современного научно-прикладного направления известного как «Теория опробования». Это направление получило дальнейшее развитие в работах Pitard (1993) и Francois-Bongarcon (1993) и ряда

других исследователей. Успешное использование «Теории опробования» при планировании геологоразведочных работ в последующем поставило новую задачу: найти оптимальное соотношение между качеством и количеством проб. Предложенный автором алгоритм (Abzalov, 2014) стал первым успешным решением этой задачи, что позволило находить оптимальное соотношение между качеством пробы и сетью опробования.

─ Внедрение математических методов в практику горных и геологоразведочных работ сопровождалось также предложениями их использования для классификации запасов. К сожалению, до настоящего времени нет единого подхода к этой проблеме. Наиболее часто используют следующие методы:

- ошибка кригинга (Blackwell, 1998);
- различные математические формулы, использующие геостатистические параметры (Arik, 1999);
- величина разброса в оценке характеристик очистной панели, вычисляемая методами условного стохастического моделирования (Dimitrapoulos, 2002);
- вероятностная оценки превышения допустимого порога (Davis, 1992, Schofield, 2001);
- геостатистическая функция - F (Annels, 1996);
- классификация, основанная на оценке достоверности запасов в блоках, соответствующих годовой и квартальной добычи (M.Belanger, personal communication).

─ Построение 3-х мерных геологических моделей и оценка их достоверности остается наименее разработанной областью математического моделирования геологических объектов. Сложность вызвана многообразием геологических структур и геометрических форм, геологических объектов, что затрудняет выработку единого подхода в их геометризации и оконтуривании. В настоящее время предложено несколько алгоритмов. Наиболее часто применяется метод усеченного мульти-Гауссового симулирования (Plurigaussian…, 2011) и метод многоточечной статистики (Strebelle, 2002). Альтернативный подход был разработан автором главным образом для оконтуривания золоторудных тел штокверкового типа (Abzalov and Humphreys, 2002). Предложенный автором метод оконтуривания основан на вероятностной математической оценке геостатистических индикаторов.

Во второй главе «Типы месторождений» описаны основные объекты где проводились работы. Методы, разработанные автором, максимально приближены к универсальным и успешно применялись на месторождениях самых различных типов: от жильных золоторудных до крупно-объемных, включая медно–порфировые, железорудные, урановые и др.

Предложенная методика была апробирована на объектах с самыми различными системами отработки: подземной и открытым карьерным способом, на урановых месторождениях, отрабатываемых методом подземного выщелачивания, и морских россыпях, эксплуатируемых драгированием.

Золоторудные месторождения орогенного типа. Обсуждаемые золоторудные месторождения (см. рис. 1) расположены в различных регионах Зармитан (Средняя Азия), Норсман, Балларат (Австралия), Мелиадин (Канада), Наталка (Россия), Сиссингу, Янфолила (Западная Африка). Эти месторождения характеризуются самыми разнообразными структурами, и поэтому данная подборка может считаться представительной для орогенного типа золоторудных месторождений.

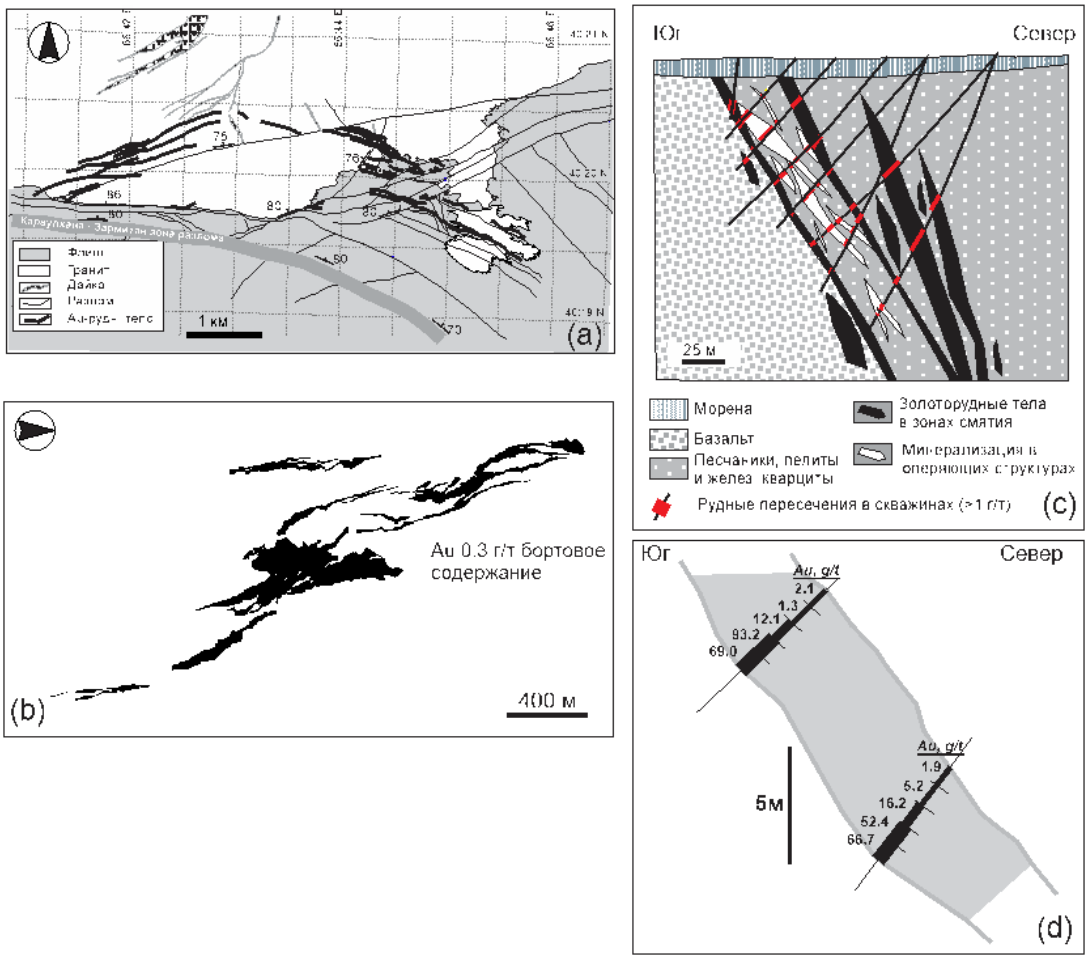


Рис. 1. Структура золоторудных месторождений: (a) Зармитан. Узбекистан; (b) Сиссингу, Берег Слоновой Кости; (c - d) Мелиадин, Канада (Abzalov, 2016)

Они в основном имеют сложнопостроенные структуры: с разноориентированными, ветвящимися и пересекающимися рудными зонами (см. рис. 1, a - c). Наиболее сложная геометрия наблюдается у месторождений, размещенных в зонах смятия. Однако золоторудные жильные месторождения часто характеризуются достаточно сложными структурами, например, известное месторождение Бендиго в Австралии.

Рудные тела обычно непротяженные, их мощность изменчива и распределение золота весьма неравномерное, что дополнительно усложняет структуру месторождения. Контакты рудных тел обычно резкие, и характеризуются быстрым изменением содержаний от нулевых до высоких или даже ураганных при пересечении контакта (см. рис. 1, d). Градационные контакты также возможны, и наиболее типичны для месторождений золота прожилково-вкрапленного типа.

Один из основных рисков при оценке запасов золоторудных месторождений это опасность завышения запасов из-за чрезмерной экстраполяции высоких содержаний. Поэтому, для оценки запасов рудные тела строго оконтуриваются, используя различные бортовые значения. Для этой цели автор разработал геостатистический метод индикаторов, с помощью которых была построена 3-х мерная вероятностная модель рудных тел для месторождения Мелиадин в Канаде.

При оценке запасов золоторудных объектов существует другая распространенная проблема – это плохая воспроизводимость результатов опробования, что обычно связано с присутствием крупнозернистого золота. Для выбора оптимальных соотношений между размером пробы и сетью опробования автором была разработана система расчетов с использованием параметра CV%, представленная в данной работе.

Месторождения железистых кварцитов. Железорудные проекты включают несколько месторождений из геологической провинции Хамерсли расположенной в блоке Пилбара (см. рис. 2), в Западной Австралии, а также месторождение Симанду в Африке. Хамерсли относится к основной железорудной провинция Австралии и содержит многочисленные месторождения железных руд. Преимущественно это железистые кварциты (BIF) или продукты их гидротермальной переработки, (см. рис. 2, c). Последний тип представлен в основном гематитовыми рудами, сформированными в результате ремобилизации оксидов железа гидротермальными процессами.

Все месторождения, изученные автором, характеризуются стратиформным строением. Железные руды образуют протяженные пласты и линзы, залегающие согласно с вмещающими породами. Контакты рудных тел с вмещающими породами обычно резкие, Содержание железа и других компонентов по простиранию рудных тел весьма неравномерное

На поверхности месторождения отмечена кора выветривания, по местной терминологии “хайдрейтет кеп”, которая содержит значительные запасы руды и характеризуется исключительной изменчивостью содержаний железа и крайне неравномерным распределением каолина и других “вредных” примесей. Геологической особенностью данной провинции является широкое распространение железных руд палео-руслового типа (CID-type) (см. рис. 2 a, b). Это второй, экономически наиболее значимый тип железных руд в Австралии. Эти месторождения формируются в меандрирующих руслах древних рек, которые заполнены пизолитами гетит-гематитового состава. Пизолиты (оолиты) обычно менее 2 мм в диаметре и характеризуются наличием гематитового ядра, окруженного оболочкой гетита. Они сцементированы в жесткую породу матрицей тонкозернистого гематита. Железорудные месторождения разведываются и готовятся к отработке используя широкие буровые сети, часто 300x200м и 200x100 м. При такой сети опробования подсчитывать запасы традиционными методами, включая кригинг, приходится крупными панелями, размером часто 150x100 м. Линейные методы (кригинг) не позволяют рассчитать распределение рудных компонентов маленькими блоками - 20x20x12 м, которые соответствуют селективности горных работ. Для решения этой

методологической проблемы автор разработал новый метод, LUC (Abzalov, 2006), который был успешно применен на железорудных объектах Австралии и Африки.

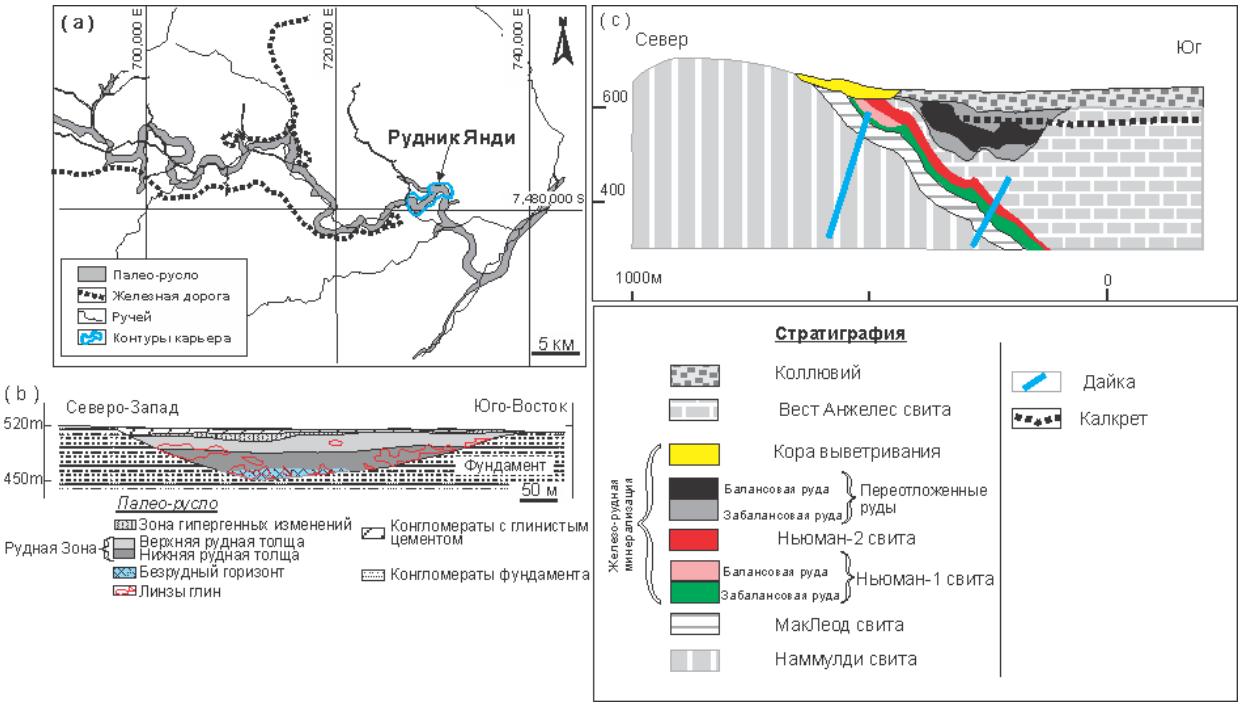


Рис. 2. Железорудные месторождения синклинория Хамерсли; (a) Геологическая карта и разрез (b) месторождения Янди палео-руслового типа; (c) Геологический разрез месторождения Наммулди BIF-типа

Урановые месторождения песчаникового типа. Месторождения песчаникового типа являются наиболее распространенным типом урановых месторождений, который содержит 28 % мировых запасов урана. По условиям залегания месторождения подразделяется на четыре группы: урановые роллы, пластовые (долинные), палеорусловые и песчаниковые месторождения зон разломов.

Данный обзор включает несколько месторождений песчаникового типа: Буденовское, расположенное в Шу-Сарысу бассейне, в Казахстане, несколько месторождений осадочного бассейна Грейт Дивайд, в штате Вайоминг, США и палеорусловые месторождения бассейна Каллабонна, Южной Австралии (см. рис. 3).

Урановая минерализация на этих месторождениях была сформирована в слабо консолидированных высокопроницаемых песках в результате переноса и отложения урановых окислов низкотемпературными растворами. Данные условия отложения привели к формированию чрезвычайно сложных по форме рудных тел. В плане рудные тела обычно представлены меандрирующими лентами или сложены разно ориентированными и быстро выклинивающимися линзовидными телами. В разрезе, рудные тела часто имеют дугообразную форму (роллы). Урановые роллы, сливаясь и накладываясь в результате многократных перераспределений образуют комплексные амебовидные рудные тела (см. рис.

3). Пластовые формы урановой минерализации так же широко распространены, но, как правило, они отмечаются на месторождениях долинного типа. Главными урановыми минералами являются настуран (урановая смолка) и коффинит, которые легко растворяются серной кислотой или щелочными растворами.

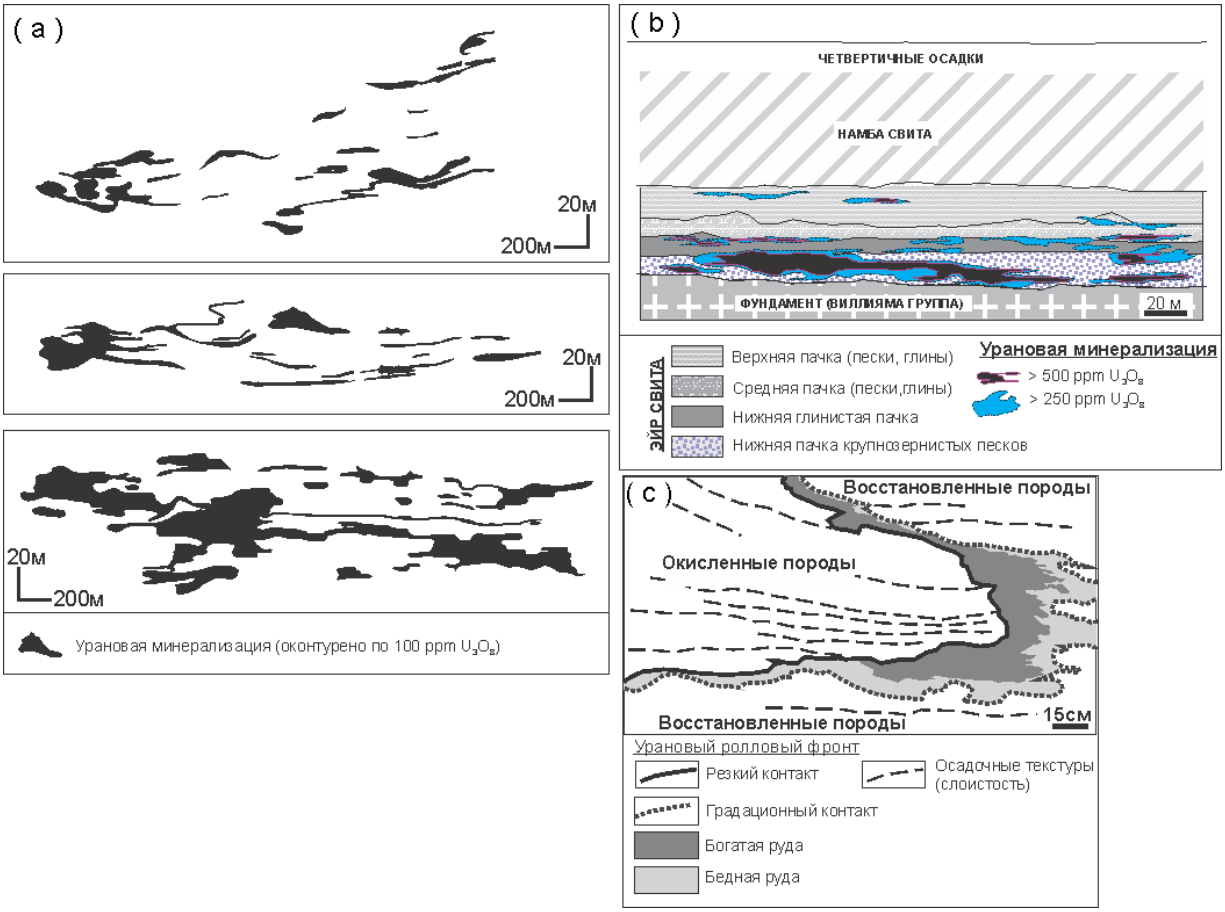


Рис. 3. Геологические разрезы урановых месторождений песчаникового типа: (a) урановые роллы месторождения Буденовское в Казахстане; (b) пластовые урановые тела месторождения Хонимун в Австралии; (c) ролловый фронт, месторождение Ширлей, штат Вайоминг, США

Эти месторождения обычно отрабатываются методом внутрипластового выщелачивания. Этот способ требует построения 3-х мерной модели рудных тел с оценкой степени ее неопределенности. Для выбора оптимальной буровой сети при которой достигается допустимая степень риска (неопределенности) при минимальных затратах автор стал применять разработанные им методы. Это оконтуривание роллов используя геостатистические индикаторы и выбор оптимальной буровой сети путем стохастической оценки степени неопределенности модели.

Месторождения бокситов. Представленные бокситовые месторождения Австралии, Бразилии, Гвинеи и Саудовской Аравии (см. рис. 4) относятся к крупным месторождениям. Годовая производительность рудников оценивается в несколько миллионов тонн бокситов и продолжительностью работы рудников до 40 лет. Рудные тела этих месторождений имеют форму пластов, мощность которых небольшая, обычно первые несколько метров, но характеризуются

значительной протяженностью и могут занимать площади в несколько сотен и даже тысяч квадратных километров. Большие площади месторождений в совокупности со сложной вертикальной и горизонтальной зональностью рудных тел делают выбор оптимальной сети опробования одной из наиболее важных и приоритетных задач для геологов, работающих на бокситовых рудниках. Даже небольшие изменения буровой сети могут иметь существенные экономические последствия поэтому важной частью работы геологов на бокситовых рудниках становятся математические расчеты.

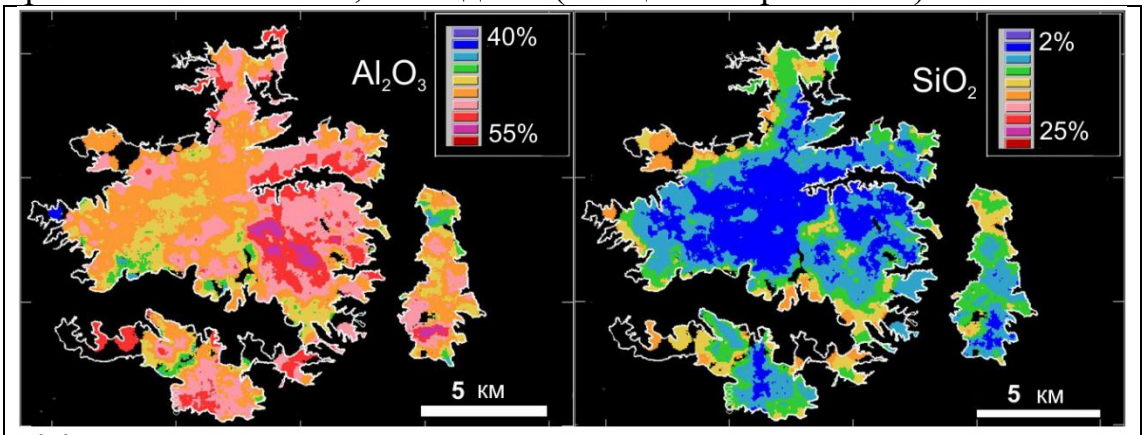
Автор разработал методы оптимизации буровой сети на австралийских месторождениях, Вейпа и Гов, а затем применил их для месторождений Бразилии и Гвинеи.

Месторождение Вейпа расположенное на полуострове Кейп Йорк. Протяженность 180 км с севера на юг при ширине 20–60 км с востока на запад. Плато сложено продуктами выветривания морских осадочных пород раннемелового возраста. Кора выветривания мощностью 20 – 35 м включает слой бокситов, от метра до 20 метров мощностью (в среднем 2 м). Бокситы сложены несцементированными пизолитами, главные минералы которых гиббсит и бемит. Содержание Al_2O_3 в бокситах меняется в интервале от 45 до 55 %, снижаясь у границы плато, а также при приближении к верхнему и нижнему контактам слоя (см. рис. 4).

Бокситы перекрыты слоем почв и подстилаются 1-2 метровым слоем латеритов кремнисто-каолин-железистого состава. Данный профиль сохранятся на всей площади плато, но мощности слоев могут сильно варьировать.

Месторождение Гов расположено на одноименном полуострове, где бокситовые руды залегают на сложно расчлененном плато, представляющем собой третичный пенеплен, частично разрушенный в четвертичное время. Кора выветривания, сформировавшая пенеплен, образовалась на осадочных породах раннемелового возраста, которые с угловым несогласием залегают на породах протерозоя.

Бокситовый горизонт неоднородный, что принципиально отличает месторождение Гов от плато Вейпа. На месторождении Гов выделятся четыре слоя бокситов, в стратиграфической последовательности от основания к кровле горизонта: нижний слой бокситовых конкреций, кавернозный слой, слой сцементированных пизолитов, свободные (не сцементированные) пизолиты.



(а)

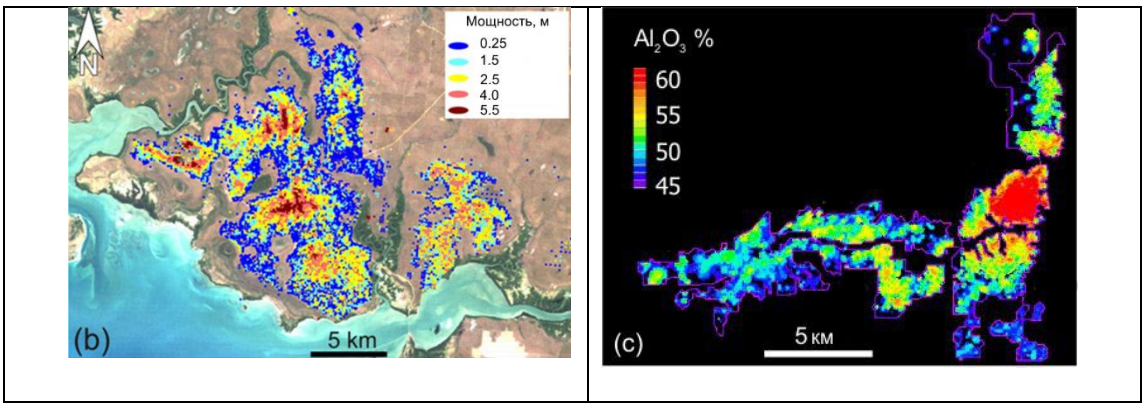


Рис. 4 - Зональность бокситовых месторождений: (a) Гов, Австралия; (b) Вейпа, Австралия; (c) Сангареди, Гвинея

Средняя мощность бокситов на месторождении Гов составляет 3,7 м и снижается от центра к границе плато. Состав бокситов также меняется, содержание алюминия в центре плато выше и уменьшается в направлении к границе плато, где одновременно с падением содержаний алюминия возрастает содержание кремния (см. рис. 4). На месторождении Гов данная зональность повторяется на каждом плато, в отличие от месторождений западной Африки, где эрозионные врезы более молодые и сформировались после образования латеритной коры выветривания.

Структура бокситовых слоев еще более усложняется при формировании бокситов на различном протолите. Так, например, на месторождении Амаргоза в Бразилии кора выветривания и связанные с ними бокситы образовались при выветривании анартозитов и гнейсов и как следствие различия исходных пород состав двух типов бокситов заметно отличается.

На месторождениях бокситов автор разрабатывал принципы выбора буровой сети для классификации запасов месторождений. Здесь впервые было показано, что в качестве допустимой погрешности (допустимая величина ошибки) следует использовать разницу между средним содержанием металла в руде и его экономически минимально допустимым содержанием (break even grade). Далее стохастическими методами находилась оптимальная сеть опробования, при которой ошибка не превышала допустимую величину. Предложенный автором метод был внедрен и успешно применяется на многих предприятиях в Австралии, Бразилии, Африке, Канаде и на Ближнем Востоке.

Месторождения минеральных песков. Минеральные пески, обозначаемые в англоязычной классификации как “mineral sands” представлены россыпными месторождениями титана и циркония. Эта группа включает три близких типа: прибрежно-морские палео-россыпи, эоловые пески (дюны) и крупные аллювиальные россыпи.

Основные работы автором проводились на россыпном титановом месторождении Ричардс Бей в Южной Африке, где руды залегают в дюнных комплексах и на месторождениях Корридор Сэндс в Мозамбике и Форт Дофин в Мадагаскаре. Два последних месторождения относятся к типу прибрежно-морских палео-россыпей.

Месторождение Ричардс Бей сложено песками четвертичного возраста, которые представлены системой дюнов на Атлантическом побережье ЮАР (рис. 5). Пески свободные и лишь на отдельных участках слабо-сцементированы гипергенными процессами.

Дюны формировались в результате флуктуации уровня моря в среднем и позднем плейстоцене. Обнажение морского дна сопровождалось перераспределением песков эоловыми процессами, которые сформировали комплекс прибрежных дюнов, протяженностью в десятки километров. Мощность дюнов в районе месторождения Ричардс Бей превышает 200 м (см. рис. 5). Последующее выветривание дюнов приводило к образованию линз и прослоев калкрита и феррикрита.

Месторождение Корридор Сэндс расположенное на юге Мозамбика относится к типу морских палео-россыпей. Это крупнейшее в мире месторождение ильменита, по оценкам компании WMC Resources запасы месторождения составляют 16,5 миллиардов тонн при среднем содержании полезных минералов (ТНМ) 5%.

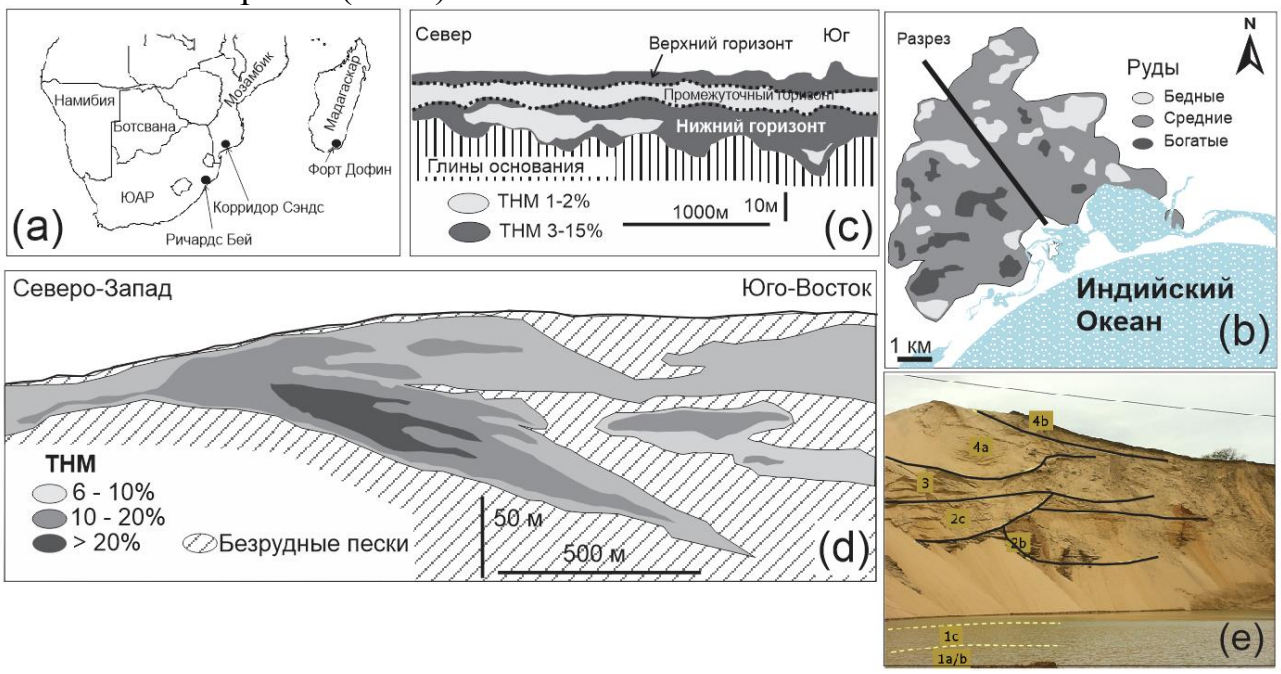


Рис. 5: (a) схема размещения минеральных песков юго-восточной Африки;
(b) схема распределения концентраций ТНМ (полезных минералов) на месторождении Форт Дофин, (Мадагаскар);
(c) геологический разрез месторождения Форт Дофин;
(d) геологический разрез месторождения Корридор Сэндс (Мозамбик);
(e) титаноносные дюны месторождения Ричардс Бей, (ЮАР).

Месторождение Корридор Сэндс сформировалось в процессе длительного накопления и переотложения песков в разных фациальных обстановках. В результате многостадийного процесса накопления песков сложилась сложная стратиграфия месторождения. Отдельные стратиграфические единицы (домены) представлены линзами, пластами, лентами, призмовидными и клиновидными телами, залегающими с угловыми

несогласиями (см. рис. 5). По условиям образования пески относятся к прибрежно-морской и приливно-отливной фациям, которые с несогласием перекрываются современными флювиальными и эоловыми песками. Контакты стратиграфических единиц резкие и часто маркируются прослоями почвы, что указывает на перерывы в седиментации.

Содержание ильменита и других рудных минералов в песках растет от древних к более молодым. Обогащение более молодых песков рудными минералами произошло в результате переработки и переотложения песков.

Месторождение Форт Дофин, расположенное на юге Мадагаскара, также является крупной морской палео-россыпью, которая отложилась на горизонте глин морского происхождения (см. рис. 5). В основании песчаной пачки выделяется нижний горизонт, сложенный хорошо сортированными и окатанными мелкозернистыми песками, что указывает на их отложение в условиях мало-энергетического морского бассейна. Перекрывающие пески отличаются по содержанию рудных минералов, и по этому признаку подразделяются на промежуточный и верхний горизонты (см. рис. 5).

На этих месторождениях автор совершенствовал и апробировал разработанные им методы контроля за качеством опробования и применил параметр CV% для сопоставления различных данных.

Третья глава «Контроль за качеством данных (QAQC)»

Представительность и качество геологических проб проверяется путем отбора дубликатов. Этот подход исторически сложился в геологии и многие годы успешно применятся в горной индустрии для обеспечения качественного и достоверного опробования рудных тел. На практике, дубликатом пробы может быть другая проба, отобранная из взрывного шпура или вторая половина бурового керна. Дубликаты также систематично отбираются в процессе пробоподготовки, когда измельченная проба сокращается специальными делителями. Пробоподготовка дубликатов должна быть идентичной той, что использована при подготовке первой пробы и обычно осуществляется в той же лаборатории. Часть дубликатов анализируется в другой, арбитражной, лаборатории для внешнего контроля.

Анализы дубликатов отличаются от исходной пробы, что связано с гетерогенностью опробованной минерализации (Fundamental Sampling Error) и ошибками при подготовке и анализе проб (Abzalov, 2016). Чем гетерогеннее проба, например, крупнозернистое золото, тем сложнее добиться хорошей воспроизводимости результатов опробования.

Процедура заверки проб относительно проста. Дубликат сравнивается с исходной пробой и на основании выявленных различий оценивается степень представительности проб. Несмотря на кажущуюся простоту метода, единой системы обработки данных не существует. Используются различные статистические методы, которые выбираются субъективно и не всегда позволяют достоверно оценить степень представительности проб.

CV% - универсальная мера относительной ошибки опробования. Автором был разработан критерий CV% (Abzalov, 2008), и предложен как универсальная

мера относительной ошибки опробования. В отличие от других критериев, например, критерии Ричардса – Чечета или MAPD, критерий CV% позволяет количественно сравнивать ошибку опробования с геологической изменчивостью рудного тела и на этой основе находить оптимальное соотношение между качеством пробы и количеством (т.е. расстояние между пробами в сети опробования). Благодаря возможности учитывать влияние геологических факторов критерий CV% также хорошо подходит для анализа двойниковых скважин.

Относительная ошибка опробования (relative error) вычисляется из разницы анализов пробы и ее дубликата и обычно представлена в виде дисперсии разброса значений, нормализованных на среднее значение пары: проба – дубликат.

Математически, это представлено уравнением (3.1)

$$CV\% = 100\% \text{ x } \sqrt{\frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{(a_i - b_i)^2}{(a_i + b_i)^2}\right)}, \qquad (3.1)$$

где a_i и b_i - соответственно проба и дубликат i-ой пары; N - количество пар данных.

Эта формула является математическим выражением коэффициента вариации парных данных, представленного в виде процентов, поэтому используется аббревиатура CV%. Соответствие выражения 3.1 статистической переменной, известной как коэффициент вариации, можно показать на одном примере, рассчитав величину CV% только в одной паре проба – дубликат, то есть в формуле 3.1, N равно 1.

Напомним, что статистический коэффициент вариации CV - это отношение стандартного отклонения выборки к ее среднему значению.

Соответственно, $$CV\% = 100\% \text{ x } \frac{\sigma}{m},$$

где m – среднее арифметическое, σ- стандартное отклонение. Стандартное отклонение это квадратный корень дисперсии переменной величины, т.е. $\sqrt{\sigma^2}$. Дисперсия (σ^2), известная также как второй центральный момент выборочного распределения, вычисляется по уравнению (3.2),

$$\sigma^2 = \frac{\sum\left(x_i - \frac{\sum x_i}{k}\right)^2}{k - 1} \qquad (3.2)$$

где x-значение переменной величины, k-количество значений (размер выборки).

Используя эту формулу рассчитаем дисперсию выборки которая включает только одну пару проба-дубликат (т.е. k = 2) (3.3):

$$\sigma^2 = \frac{(a_1 - \frac{a_1+b_1}{2})^2 + (b_1 - \frac{a_1+b_1}{2})^2}{2-1} = \frac{(\frac{2a_1-a_1-b_1}{2})^2 + (\frac{2b_1-a_1-b_1}{2})^2}{1} = \frac{(a_1-b_1)^2 + (b_1-a_1)^2}{4} = \frac{(a_1-b_1)^2}{2} \qquad (3.3)$$

Извлекая корень из выражения (3.3) получим стандартное отклонение выборки (3.4)

$$\sigma = \sqrt{\frac{(a_1 - b_1)^2}{2}} \quad (3.4)$$

Среднее значение этой выборки $m = \frac{a_1 + b_1}{2}$ (3.5) Соответственно, поделив значение стандартного отклонения полученное уравнением (3.4) на среднее значение выборки (3.5) получаем коэффициент вариации выборки (3.6), который аналогичен ранее предложенному уравнению CV% (3.1) примененному к случаю, когда выборка включает единственную пару, проба дубликат.

$$CV\% = 100\% \text{ x } \frac{\sqrt{\frac{(a_1 - b_1)^2}{2}}}{\frac{(a_1 + b_1)}{2}} = 100\% \text{ x } \frac{\sqrt{2(a_1 - b_1)^2}}{(a_1 + b_1)} = 100\% \text{ x } \sqrt{2\frac{(a_1 - b_1)^2}{(a_1 + b_1)^2}} \quad (3.6)$$

Таким образом, значение CV% вычисленное уравнением (3.1) является коэффициентом вариации выборочной случайной величины, представленной парными данными (3.7).

$$CV\% = 100\% \text{ x } \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{\sigma_i^2}{m_i^2}} = 100\% \text{ x } \sqrt{\frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{(a_i - b_i)^2}{(a_i + b_i)^2}\right)} \quad (3.7).$$

Автор апробировал этот критерий на десятках различных месторождений и предложил значения, которые можно использовать как допустимый уровень ошибки опробования (см. табл. 1).

Таблица 1 - Допустимые значения CV% по типам месторождений (Abzalov, 2008)

Тип оруденения	Полезный элемент	Уровень лучших показателей в горной индустрии	Типовой – приемле-мый результат	Тип опробования
Золоторудное, крупнозернистая текстура оруденения, крайне неравномерное распределение золота	Au (г/т)	20 (?)	40	Дубликаты не дробленной пробы
Золоторудное, преимущественно среднезернистая текстура оруденения	Au (г/т)	20	30	Дубликаты не дробленной пробы
	Au (г/т)	10	20	Дубликаты истертой пробы
Cu-Mo-Au порфировое	Cu (%)	5	10	
	Mo (%)	10	15	

	Au (г/т)	10	15	Дубликаты не дробленной пробы
	Cu (%)	3	10	Дубликаты истертой пробы
	Mo (%)	5	10	
	Au (г/т)	5	10	
Железорудное, тип-CID	Fe (%)	1	3	Дубликаты не дробленной пробы
	Al_2O_3 (%)	10	15	
	SIO_2 (%)	5	10	
	LOI (%)	3	5	
Cu-Au-Fe скарны и месторождения типа IOCG (Олимпик Дам)	Cu (%)	7.5	15	Дубликаты не дробленной пробы
	Au (г/т)	15	25	
	Cu (%)	5	10	Дубликаты истертой пробы
	Au (г/т)	7.5	15	
Медно-никелевое сульфидное	Ni (%)	10	15	Дубликаты не дробленной пробы
	Cu (%)	10	15	
	Платиноиды (г/т)	15	30	
	Ni (%)	5	10	Дубликаты истертой пробы
	Cu (%)	5	10	
	Платиноиды (г/т)	10	20	
Титановые палеороссыпи	Тяжелая фракция (%)	5	10	Дубликаты не дробленной пробы

Соотношение между качеством проб и сетью опробования. Достоверность подсчитанных запасов зависит от качества проб и сети опробования. Эти два фактора взаимосвязаны поэтому естественно стремление геологов найти их оптимальное соотношение и использовать его для сокращения затрат на горно-геологические работы на рудниках. Например, замена «эйркор» бурения методом «sonic» (вибрационный метод) позволило удвоить расстояния между буровыми скважинами на руднике Ричардс Бей в ЮАР. Это позволило значительно ускорить подготовку промышленных блоков и существенно сократило стоимость работ.

Автор, применив геостатистическое и стохастическое моделирование убедительно продемонстрировал, что достоверность подсчета запасов месторождения при данной буровой сети зависит главным образом от величины «эффекта самородка» вариограммы (см. рис. 6) (Abzalov, 2014 b). В то же время из определения вариограммы известно, что величина «эффекта самородка» зависит от двух факторов. Первый фактор - ошибка опробования, второй - естественная, т.е. геологическая, изменчивость руды на коротких расстояниях. Таким образом, если количественно охарактеризовать оба фактора, то можно

оценить их вклад в «эффект самородка» и вычислить оптимальное соотношение между качеством пробы и расстоянием между пробами в геологоразведочной сети.

Автор установил, что для количественной оценки двух факторов можно использовать относительную парно-нормализованную вариограмму (pair-wise relative variogram) (3.8).

$$\gamma_{\mathrm{PWR}}(\mathbf{h}) = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{[Z(x_i) - Z(x_i + \mathbf{h})]^2}{[Z(x_i) + Z(x_i + \mathbf{h})]^2} \qquad (3.8),$$

где $Z(x_i)$ и $Z(x_i+\mathbf{h})$ означают пространственную переменную в точках (x_i) и ($x_i+\mathbf{h}$) разделенных вектором ($\mathbf{h}$).

Выражение (3.8) аналогично квадрату параметра CV%, то есть равен относительной дисперсии выборки данных (σ^2_{RSV}) (3.9).

$$\sigma^2_{RSV} = \mathrm{CV}^2 = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{(a_i - b_i)^2}{(a_i + b_i)^2}\right) \qquad (3.9),$$

Следовательно, обе величины могут быть рассчитаны по единой формуле. На этой основе количественно оценивается вклад двух факторов в «эффект самородка»: ошибка опробования и геологическая неоднородность руды. В этом принципиальное значение параметра CV% (3.1). Впервые найдена единая формула, которая позволяет количественно охарактеризовать и сравнить ошибку опробования с геологической изменчивостью рудного тела.

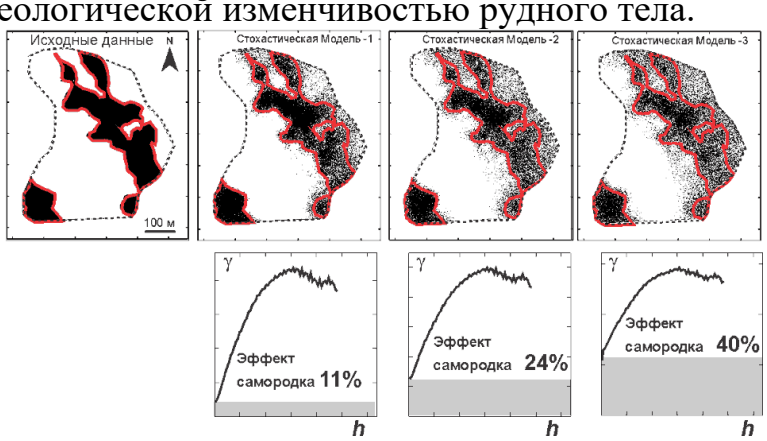


Рис. 6. Модели содержаний урана, построенные используя вариограммы с разной величиной «эффекта самородка»

Описание метода. Сначала строится относительная парно-нормализованная вариограмма (pair-wise relative variogram) и определяется величина «эффекта самородка» ($\gamma_{\mathrm{PWR}}(\mathbf{0})$). Этот параметр является суммой двух дисперсий, одна вызвана ошибкой опробования (σ^2_{RSV}), вторая связана с геологической неоднородностью рудного тела (σ^2_{Geol}) (см. рис. 7).

Первая дисперсия (σ^2_{RSV}) вычисляется уравнением (3.9), вторая (σ^2_{Geol}) определяется путем вычитания первой величины из экспериментально полученного эффекта самородка (3.10)

$$\sigma^2_{Geol} = \gamma_{\mathrm{PWR}}(0) - \mathrm{CV}^2_{\mathrm{FD}} \qquad (3.10).$$

- постскрипт “FD” означает, что для расчета должны использоваться полевые дубликаты, т.е. вторая половина бурового керна.

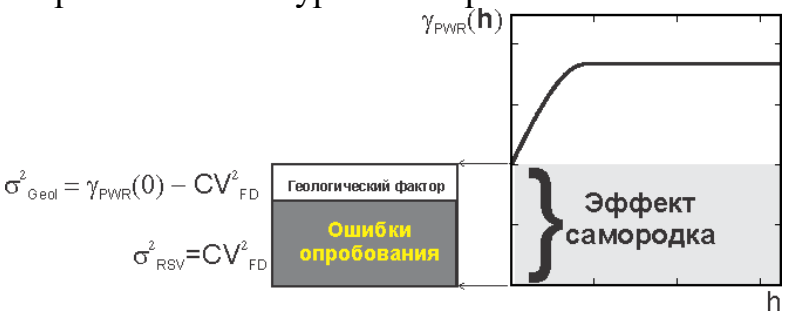


Рис. 7. Схема объясняющая вклад в геостатистический параметр «эффект самородка» двух факторов – качество опробования и геологическая изменчивость руды

Определяя величины дисперсий, связанных с ошибкой опробования (σ^2_{RSV}) и геологическими факторами (σ^2_{Geol}) для разных типов проб и схем пробоподготовки рассчитывается оптимальное соотношение между качеством и количеством проб (см. рис. 7) (Abzalov, 2014 b).

Практическая эффективность предложенного метода возрастает если при расчетах дополнительно учитывается экономическая выгода от уменьшения потерь руды, которая достигается путем оптимизации схемы опробования (Abzalov, 2016).

В четвертой главе «Вероятностные геологические модели» для точной оценки запасов месторождения и выбора методов его отработки оконтуриваются рудные тела и строится их 3-х мерная модель. Кроме четкого представления геометрии рудных тел, 3-х мерные модели также должны отображать их внутреннюю структуру, включая зональность, наличие безрудных прослоев, наложенные изменения и распространение зон гипергенного выветривания вмещающих пород и руд. Модель так же должна включать небольшие геологические тела имеющие практическое значение для безопасной и экономически рентабельной работы рудника, например, жилы пегматитов, дайки и разломы. Точное картирование геологических объектов и аккуратное представление их внутренней структуры не всегда возможно, особенно на геологически сложных объектах, где плотность опробования недостаточна для их детального крупномасштабного картирования. Поэтому современная горная индустрия широко использует вероятностные модели, обзор которых сделан в монографии автора (Abzalov, 2016).

Один из приемов построения вероятностной модели рудного тела был разработан автором и основывается на использовании геостатистических индикаторов содержания металла в руде. Метод первоначально предназначался

для оконтуривания золоторудного штокверка на месторождении Мелиадин в Канаде (Abzalov, 2016) где наличие разновозрастных генераций и минеральных ассоциаций, контролируемых разно ориентированными и взаимно пересекающимися структурами, не позволили оконтурить рудные тела традиционными детерминисткими методами (wireframes). После успешного применения метода на золоторудном месторождении в Канаде, он затем применялся для оконтуривания урановых роллов, тектонически перераспределенных медно-никелевых руд месторождений Камбалды и месторождений медно-порфировой формации (Abzalov, 2016).

Для создания вероятностной модели необходимо выбрать пороговые значения содержаний металла в руде и преобразовать непрерывную переменную в геостатистические индикаторы (см. рис.8).

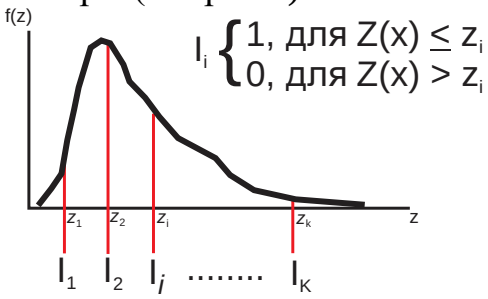


Рис. 8 - Разделение непрерывной переменной на несколько индикаторов

За пороговое значение принимается содержание близкое минимальному экономически рентабельному бортовому содержанию металла на данном месторождении. При наличии богатых рудных столбов, особенно если они контролируются другими структурами, отличными от тех, что контролируют распределение рядовых руд, выбираются дополнительные индикаторы (см. рис. 9).

Распределение выбранных индикаторов в 3-х мерном пространстве рудного тела моделируется методом Ординарный кригинг с помощью которого значения индикаторов интерполируются в блочную модель и строится вероятностная модель данного индикатора (см. рис. 9). Рудные тела и отдельные блоки (домены) оконтуриваются по вероятности блока превысить пороговое значение, которое определяется геологом путем сопоставления вероятностной модели индикаторов с геологическими разрезами по степени близости с исходными данными. При правильном выборе индикаторов и умелом анализе их пространственного распределения этот метод позволяет строить детальные 3-х мерные модели месторождений, даже для таких структурно сложных типов, как урановые роллы (см. рис. 10).

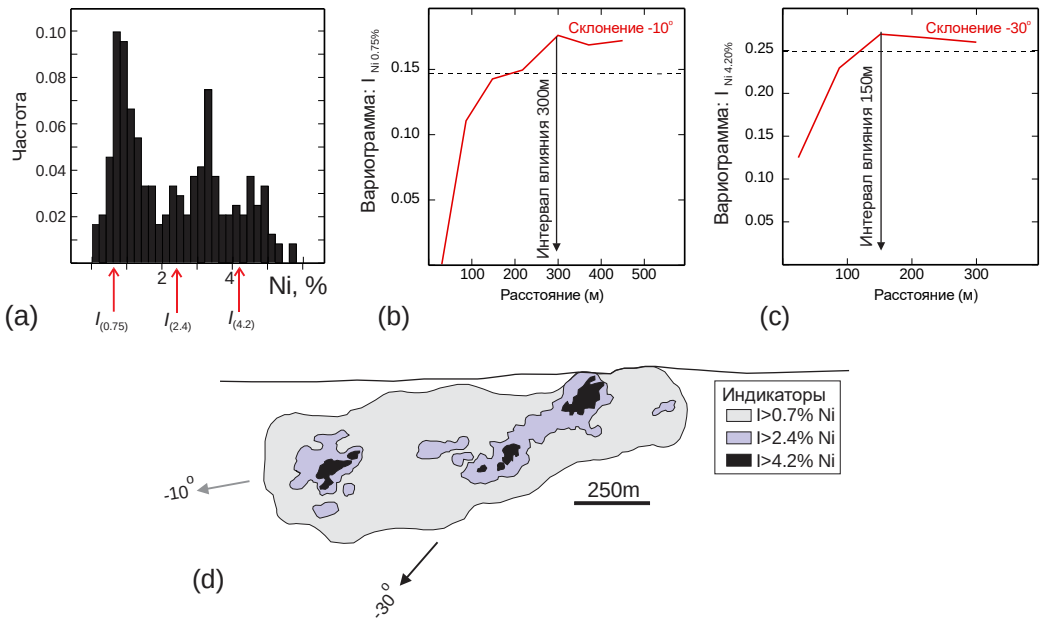


Рис. 9. Геостатистическая модель, месторождение Клифф: (a) гистограмма содержаний никеля с указанными значениями индикаторов, выбранных для построения вероятностной модели; (b) вариограмма индикатора I_{Ni} > 0.75 %, соответствующего рядовым рудам; (c) вариограмма индикатора I_{Ni} > 4.2 %, соответствущего богатым рудам; (d) вероятностная модель индикаторов.

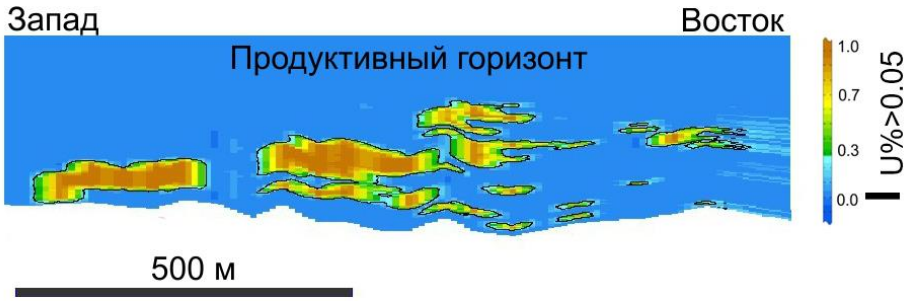


Рис. 10. Урановый ролл, оконтуренный методом геостатистических индикаторов

В пятой главе «Новый метод подсчета запасов (LUC)» автор аргументированно указывает что современные требования горной индустрии диктуют необходимость подсчета запасов в небольших блоках, соответствующих по своим размерам минимальным блокам, которые могут быть селективно извлечены при принятой схеме отработки. В англоязычной литературе для минимально извлекаемых блоков используется сокращение SMU (selectively mineable unit), который будет использоваться в данной работе.

К сожалению, математические методы, в основе которых лежит принцип линейной регрессии, включая кригинг, и которые широко используются для подсчета запасов, имеют серьезные ограничения. Линейные методы не пригодны для оценки запасов в маленьких блоках, если буровая сеть превышает размер этих блоков в несколько раз. Ошибка оценки может оказаться недопустимо большой, ставя под угрозу инвестиции в проект. Для таких объектов необходимо использование методов нелинейной геостатистики. До недавнего времени, нелинейная геостатистика ограничивалась только оценкой функциональной зависимости между объемом и содержанием, которое рассчитывалось для

разных размеров SMU, но при этом местоположение блоков оставалось неизвестным.

В 2006 году автор предложил новый метод, LUC (Localised Uniform Conditioning) который позволил решить проблему маленьких блоков в геостатистике (Abzalov, 2006). Этот метод изложен в этой части работы и представлен автором как одно из защищаемых положений диссертации.

Концепция – Извлекаемые запасы (recoverable resources). В горной индустрии общеизвестно, что процент извлечения руды на месторождении зависит от метода отработки. Чем выше селективность горных технологий, тем выше коэффициент извлечения руды. Влияние размеров блоков на извлекаемые запасы показано на рис. 11. Очевидно, что при одном и том же бортовом содержании запасы руды существенно отличаются, следовательно, параметры блочной модели должны соответствовать селективности горного метода на данном руднике (см. рис. 11). Запасы, подсчитанные для размеров блоков, соответствующих SMU данного проекта, в геостатистике называются извлекаемые (recoverable resources).

Стоимость горных работ тоже зависит от метода отработки и обычно повышается с повышением селективности метода. Поэтому при проектировании рудников, одна из важнейших задач геологических служб компаний найти оптимальный метод, при котором достигается максимальный процент прибыли. Для этого необходимо построить несколько блочных моделей используя разные размеры блоков, соответствующих анализируемым сценариям горных работ. То есть, для каждого варианта горных работ создается модель рудного тела где размер блоков соответствует SMU данного метода. Эти модели сравниваются и выбирается вариант при котором на данном месторождении достигается максимальная экономическая рентабельность.

Именно для решения этих задач автором был разработан метод LUC (Abzalov, 2006), который позволяет оценивать запасы непосредственно в блоках размером SMU данного рудника и может применятся при широкой буровой сети.

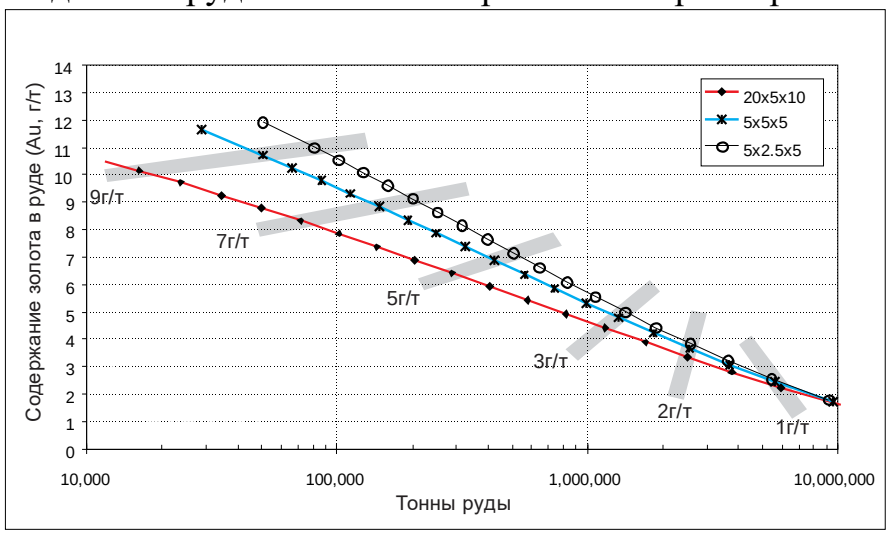


Рис. 11. Запасы опытного участка золоторудного месторождения Мелиадин в Канаде рассчитанные для разных бортовых содержаний золота (от 1 до 9

г/т Au) и для разных размеров блоков SMU, соответствующих разным методам отработки (Abzalov, 2016)

Теоретическая основа. Закономерная зависимость дисперсии выборки от объема пробы на интуитивном уровне известна давно и геологи всегда учитывали этот факт при сопоставлении крупно-объемных проб с результатами, например, кернового опробования. В геостатистике эта зависимость хорошо изучена и описывается формулой (5.1), которая известна как отношение аддитивности Криже. Поскольку формула 5.1 определяет взаимосвязь дисперсии случайной величины и ее размера, отсюда ее другое название, принятое в геостатистике, «отношение объема и дисперсии» (volume-variance relationship).

$$\sigma^2(\boldsymbol{v}\,|\,\boldsymbol{D}) = \sigma^2(0\,|\,\boldsymbol{D}) - \sigma^2(\mathrm{o}\,|\,\boldsymbol{v}) = \sigma^2(0\,|\,\boldsymbol{D}) - \overline{\gamma}(\boldsymbol{v}) \tag{5.1}$$

где $\sigma^2(v\,|\,D)$ дисперсия содержаний металла в блоках (v) распределенных в объеме большего блока (D) (см. рис. 12). Размер блока (v) соответствует SMU данного рудника. Блок (D) может представлять все рудное тело, как схематично показано на рисунке 12 a, или, в случае метода LUC, это будет крупная прямоугольная панель (V), показанная на рисунке 12 b;

$\sigma^2(0\,|\,D)$ дисперсия точечных данных zi(x) (например керновые пробы) в объеме блока (D);

$\sigma^2(o\,|\,v)$ дисперсия точечных данных zi(x) в объеме SMU (v).

Формула 5.1, математически описывающая принцип «отношение объема и дисперсии» является теоретическим обоснованием методов нелинейной геостатистики которые применяются для оценки извлекаемых запасов.

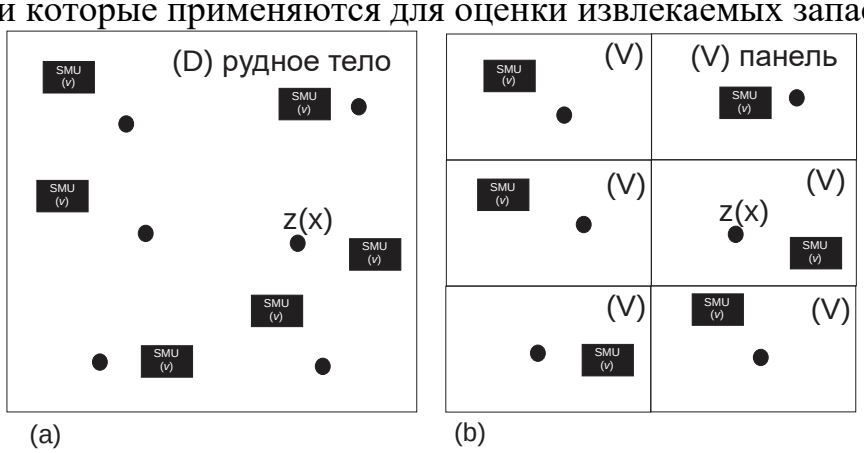


Рис. 12. Схема объясняющая переменные величины, представленные в уравнении 5.1: (a) в объеме рудного тела (D); (b) рудное тело (D) подразделено на панели (V)

Метод LUC (Localised Uniform Conditioning). Метод LUC является модернизированным методом UC (Uniform Conditioning). Геостатистически этот метод предусматривает вычисление условного математического ожидания нелинейной фукции (conditional expectation of a non-linear function) описывающей статистическое распределение металла (Z) в некотором объеме (V), объем этот называется панелью, которая имеет прямоугольную форму и

является достаточно большим блоком. Последний содержит множество SMU блоков (см. рис.12 b). При этом содержание металла, z(v), дано в маленьких SMU блоках (v).

Условное математическое ожидание вычисляется относительно среднего содержания рассчитываемого металла в панеле Z(V). Таким образом, для методов UC и LUC, необходимо, чтобы содержание металла в панеле (V) было известно. На практике, за среднее содержание металла в панеле (V) принимается его значение, подсчитанное одним из стандартных методов, (например, ординарным кригингом), т.е. вычисляется значение Z*(V).

Нелинейная функция, описывающая статистическое распределение металла по SMU блокам z(v), которые слагают панель (V), так же легко рассчитывается (Lantuejoul, 1988), путем построения системы двух уравнений (5.2 и 5.3) дискретной Гауссовой модели. Первое уравнение, (5.2), описывает соотношение дисперсии точечных данных (т.е. пробы) и дисперсии блоков SMU (v). Второе уравнение (5.3), описывает соотношению дисперсий точечных данных и панели (V).

$$Z(v) = \phi_v(Y(v)) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\varphi_k}{k!} r^k H_k(Y(v)) \qquad (5.2)$$

$$Z(V) = \phi_V(Y(V)) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\varphi_k}{k!} s^k H_k(Y^*(V)) \qquad (5.3)$$

Решая эти уравнения можно вычислить коэффициенты корреляции, (s) и (r), точечных данных (пробы) и блоков, трансформированных в стандартные Гауссовые переменные, где (s) коэффициент корреляции проба – панель и (r) коэффициент корреляции проба – SMU. Отношение этих коэффициентов (s/r) равняется коэффициенту корреляции (rvV) блоков SMU (v) и панели (V). Таким образом, вычислив коэффициенты (r) и (s), получаем нелинейную функцию, описывающую статистическое распределение переменной z(v). Можем вычислить ее математическое ожидание относительно выбранного бортового значения (5.4 - 5.6).

$$T_v(z_C) = E\left[I_{Z(v)\geq z_C} \middle| Z^*(V)\right] = E\left[I_{Y_v \geq y_C} \middle| Y_V^*\right] = 1 - G\left\{\frac{y_C - \frac{s}{r}Y_V^*}{\sqrt{1-\left(\frac{s}{r}\right)^2}}\right\} \qquad (5.4)$$

$$Q_v(z_C) = E\left[Z(v) I_{Z(v)\geq z_C} \middle| Z^*(V)\right] = \sum_{k=1}^{N}\left(\frac{s}{r}\right)^k H_k(Y_V^*) \sum_{j=1}^{N} \varphi_j r^j \int_{y_C}^{+\infty} H_k(y) H_j(y) g(y) dy \qquad (5.5)$$

$$M_v(z_C) = \frac{Q_v(z_C)}{T_v(z_C)} \qquad (5.6)$$

Это решение было найдено в 70 - 80^{е} годы прошлого столетия (Lantuejoul, 1988), но не нашло большого практического применения, поскольку этот метод не позволял определить местоположение блоков SMU в панели (V), и ограничивался лишь расчетом статистических характеристик нелинейной модели.

Дальнейшее развитие метода было предложено в 2006 году работами автора (Abzalov, 2006). Модернизированный метод позволяет рассчитывать распределение металла панели по блокам SMU и при этом определяет наиболее вероятное место данного SMU в панели. То есть метод позволяет сделать локальную оценку содержаний металла в руде, поэтому получил название Localised Uniform Conditioning (LUC). Этот метод также позволяет построить объемную модель рудного тела, разделив его на небольшие блоки, соответствующие SMU данного рудника, и рассчитать содержание металла в каждом SMU блоке. Для этого панель физически разделяется на SMU блоки, и для каждого SMU рассчитывается содержание металла при соблюдении условия:

- среднее содержание металла в панели сохраняется равным Z*(V);
- экспериментальная кривая запасов панели соответствует принципу - «отношение объема и дисперсии», т. е. удовлетворяет уравнениям (5.2 и 5.3)

Метод LUC имеет общую математическую основу с его прототипом, методом UC. Оба метода используют систему уравнений 5.2 и 5.3 для оценки запасов руды, извлекаемой блоками SMU. Решая эту систему уравнений, строится график зависимости запасов панели от выбранного бортового содержания. Далее метод LUC перераспределяет рассчитанную кривую запасов панели в ее реальное 3х мерное пространство, что ранее было невозможно.

Расчет и локализация запасов методом LUC осуществляется последовательным решением нескольких задач. Сначала необходимо рассчитать для данной панели график зависимости запасов от бортового содержания (см. рис. 13, а). Далее эта кривая разделяется (дискретизируется) на отрезки, соответствующие размерам SMU (см. рис. 13, а). Для каждого выделенного отрезка (GCi), путем дискретизации графика (см. рис. 13, а), находят нижнее и верхнее бортовое содержание (5.7):

$$GCi \subset \{TGCi\ (zi)\ ,\ TGC\ i{+}1\ (zi{+}1)\ \},\ \text{и}\ GCi \subset \{zi\ ,\ zi{+}1\}, \qquad (5.7)$$

где TGCi (zi) запасы панели (тонны) оцененные при бортовом содержании (zi) и TGCi+1 (zi+1) запасы панели при следующем значении бортового содержания (zi+1).

Таким образом, путем дискретизации графика для каждого SMU можно найти (5.8) соответствующие ему бортовые значения (нижнее и верхнее).

$$SMUK \subset (TGCK,\ TGC\ K{+}1), \qquad (5.8)$$

где k – означает номер SMU ранжированного по содержанию металла. На диаграмме (см. рис. 13, а) «k» принимает значения от 1 до 16.

Используя нижние и верхние бортовые содержания, вычисляются средние содержания металла (MGCi) в блоках SMU (см. рис.13, b). Уточним, что эти значения (MGCi) математически рассчитываются из нелинейной функции (см. рис.13, b).

Затем найденные средние содержания (MGCi) необходимо присвоить соответствующим им блокам SMU. Для этого панель разделяется на одинаковые блоки (SMU) которые ранжируются по возрастанию в них содержаний металла. Таким образом для всех SMU в панеле будет присвоен номер «k», который предложено (Abzalov, 2006) называть рангом (rank) SMU блока в панеле. На рис.13а это номера от 1 до 16.

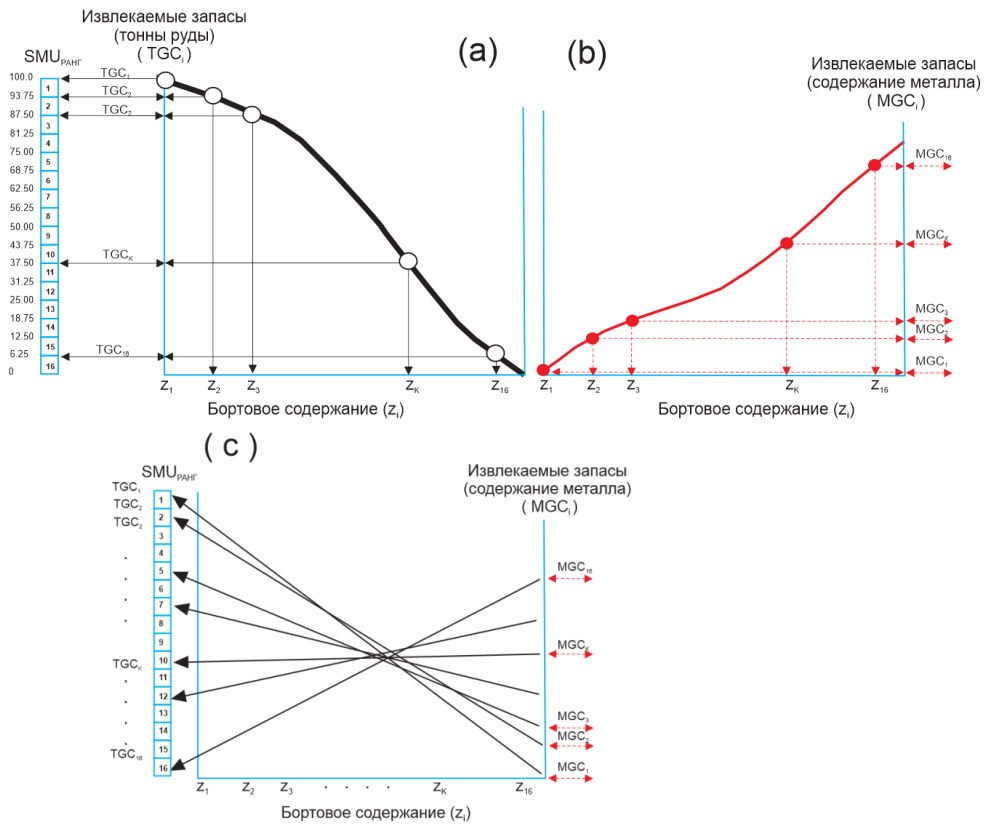


Рис. 13 - Схема расчета запасов методом LUC: (a) дискретизация кривой уравнения запасов, полученной решением системы нелинейных уравнений; (b) расчет среднего содержания металла в блоках SMU; (c) присвоение рассчитанных средних значений блокам SMU

Используя ранговый номер «k» вычисленные средние значения содержаний металла в блоках (см. рис.13, b), могут быть присвоены блокам SMU (см. рис. 13, c). Для этого необходимо чтобы ранг «k» блока SMUk совпадал с порядковым индексом «i» интервала содержаний (MGCi) на диаграмме (см. рис. 13, c).

Таким образом, для завершения расчетов методом LUC остается определить ранговые номера блоков SMU в панеле. Поскольку требуется найти только порядковый номер блоков ранжированных по возрастанию содержаний металла, т.е. точное знание содержания не требуется, то ранжировать блоки можно используя вспомогательные данные, например, результаты геофизических работ, или полуколичественное геохимическое опробование. На практике, большинство геологов ранжирует SMU блоки приблизительно определяя содержание металла в этих блоках методом кригинг или другим доступным методом линейной регрессии (см. рис.14).

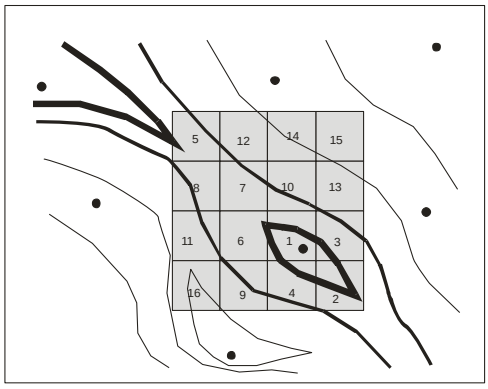


Рис. 14. Ранжирование SMU блоков от 1 до 16 по содержанию металла (то есть от богатых рудных блоков к бедным)

Пример использования метода LUC. Метод LUC был успешно применен для подсчета запасов на многих месторождениях, включая месторождения железных руд, цветных металлов, урана и золота (Abzalov, 2006, 2014, a). Один из примеров успешного использования этого метода предлагается здесь.

Метод LUC был использован для оценки запасов железных руд на месторождении Янди, в Западной Австралии (Abzalov, 2014, a). Геологоразведочное бурение на этом месторождении было проведено по следующим буровым сетям:

- Межуред (Measured): 100 x 50 м.
- Индикейтед (Indicated): 200 x 100 м.
- Инферред (Inferred): 300 x 200 м.

Запасы месторождения были подсчитаны в блоках 100x50x10 м, которые соответствуют буровой сети. Данный размер не пригоден для планирования работы рудника поскольку отработка ведется блоками SMU 25x25x10 м. При сравнении запасов с результатами добычи запасы систематически не подтверждались в среднем на 4 % (Abzalov, 2016).

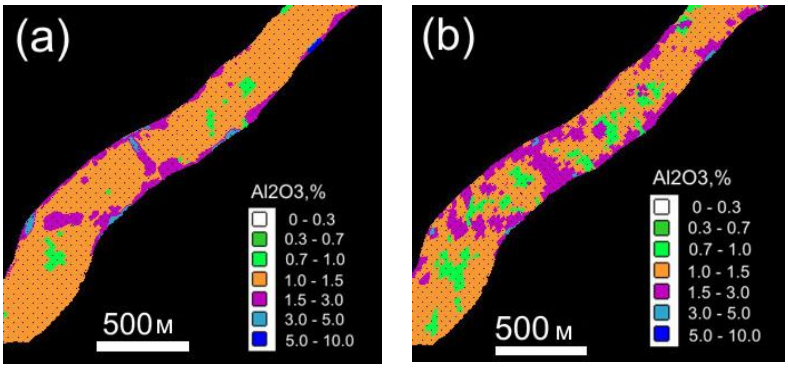


Рис. 15 - Блочная модель построенная по данным бурения по сети 100x50 м: (a) построенная методом Ординарный кригинг;
(b) построенная методом LUC

Для улучшения планирования и контроля за производством на данном руднике руководство приняло решение использовать метод LUC. В частности, было решено использовать блочную модель с размером блоков 25x25x10 м соответствующую селективности добычных работ на этом карьере. Метод

вначале был проверен на отдельном участке, где по результатам бурения 100x50м были построены две блочные модели (см. рис.15). Первая модель рассчитана методом Ординарный кригинг (см. рис.15, a), вторая, используя метод LUC (см. рис.15, b), позволила рассчитать содержание по блокам SMU 25x25x10 м**.** Сравнение двух блочных моделей наглядно показывает, что модель, построенная методом LUC, имеет гораздо большую разрешающую способность чем результаты кригинга (см. рис.15). Детальность модели LUC хорошо соответствует селективности горных работ на этом руднике и хорошо совпадает с результатами добычи

Шестая глава «Классификация запасов». Международные комитеты по запасам, такие как Австрало-Азиатский комитет JORC (2012), устанавливают общие рамки для классификации ресурсов и резервов, но не определяют метод и параметры, по которым запасы подразделяются на категории. Из-за этой неопределенности в настоящее время нет единого взгляда на принципы классификации запасов. Современные классификации запасов часто базируются на субъективных решениях геологов и зависят от опыта исполнителя. Например, общепринятая методика классифицировать запасы по сети бурения обычно использует опыт предыдущих работ на сходных объектах или могут быть предписаны вышестоящими комитетами (например, ГКЗ), и соответственно могут не учитывать специфику конкретного месторождения.

Методы геостатистической классификации – состояние проблемы. Для стандартизации классификации запасов в горной индустрии давно пытаются использовать методы геостатистики. Наиболее часто запасы классифицируются по степени их достоверности применяя условное стохастическое моделирование пространственной переменной. В англоязычной литературе эти методы называют «conditional simulation», наиболее распространенные из них SGS (Sequential Gaussian Simulation) и SIS (Sequential Indicator Simulation). Используют также ошибку кригинга и специальные геостатистические функции.

Обзор геостатистических методов предложенных для классификации запасов руды сделанный в монографии (Abzalov, 2016) показал, что в горной индустрии накоплен достаточный опыт работ и имеется широкий набор геостатистических методов оценок запасов и количественного определения рисков. Тем не менее единой системы математически обоснованных и объективных критериев классификации в настоящее время нет. Автор считает, что для выработки единого подхода необходимо найти объективное определение для следующих параметров.

Для какого объема должна рассчитываться ошибка оценки запасов. В настоящий момент используются объемы от целого месторождения до отдельного блока кригинговой модели. В последние годы широкое распространение получил подход, когда ошибка оценки запасов определяется для объемов руды, соответствующих ее годовой, и квартальной добычи.

Какая ошибка считается допустимой. Группа специалистов США и Канады предложила считать допустимой ошибку в +/- 15 %, которая теперь широко используется для классификации запасов. К сожалению, это значение

применяется без анализа его пригодности к конкретному месторождению. Это не единственный подход. Были также предложения считать допустимой ошибки +/-10 %, +/- 20 %, +/- 40 % и даже +/- 60 %.

Необходимо установить доверительный интервал ошибки. Из математической статистики известно, что два стандартных отклонения нормально распределенной выборки соответствуют доверительному интервалу в 95 % (или 0,95 CL). Это значение широко применяется в математической статистике и, по мнению автора, наиболее приемлемо для геостатистических оценок рисков. Тем не менее, на практике многие специалисты используют другие значения доверительного интервала, например, 90 % (0,90 CL).

Метод предложенный автором. В предыдущем разделе было показано, что методы условного стохастического моделирования, которые известны примерно с 1970-х, могут быть успешно использованы для оценки ошибки подсчитанного среднего содержания металла в руде. По величине этой ошибки можно классифицировать запасы. Также было показано, что сдерживающим фактором для выработки единого подхода к классификации запасов является нерешенность нескольких вопросов. Наиболее важные из них, что принимать за допустимую ошибку и в каком объеме руды это вычислять.

Обычно используемый порог допустимой ошибки в 15 %, автор нашел непригодным на многих предприятиях, где он разрабатывал принципы классификации. Например, на многих рудниках “Rio Tinto” исторически сложившаяся допустимая ошибка была 10 % при доверительном интервале 0,95. На других предприятиях порог допустимой ошибки был наоборот выше, до 20 %, например, на некоторых рудниках массивных медно-никелевых руд. Очевидно, что причина разных значений допустимой ошибки прямо зависит от степени рентабельности предприятия, чем выше процент прибыли, тем больше допустимое отклонение от подсчитанных запасов.

Автор предложил количественно оценивать допустимую ошибку по экономическим показателям предприятия. Наиболее подходящим для этого является разница между средним содержанием металла в руде и экономически минимально допустимым его содержанием (break even grade). Этот параметр, «break even grade», вычисляется при проведении технико-экономических оценок проектов. По мнению автора, это наиболее пригодный объективный критерий для определения уровня допустимой ошибки в оценке запасов руды и, поэтому, был заложен автором в основу его схемы классификации.

Объемы руды, для которых рассчитывается ошибка так же должны соответствовать технико-экономическим особенностям проекта и должны адресоваться к его основным рискам. Наиболее рациональным является подход специалистов Северной Америки, предложивших оценивать достоверность запасов в объемах, соответствующих нормам добычи руды на этом предприятии. Для «Measured» ресурсов, которые приблизительно соответствуют категории В1 системы ГКЗ СССР, они предложили использовать объем квартальной добычи. Объем годовой добычи используется для классификации «Indicated» ресурсов, которые приблизительно соответствует категории С1 системы ГКЗ СССР. Категория «Inferred», которая приблизительно соответствует запасам С2

системы ГКЗ СССР остается наименее разработанной и не была регламентирована этими специалистами.

Эти критерии, предложенные специалистами северной Америки, позволяют классифицировать запасы с учетом объемов добычи проекта, поэтому этот подход был выбран многими специалистами включая автора данной работы. Однако, автор, проверяя данные критерии на действующих предприятиях, обнаружил, что квартальный объем добычи часто непригоден для классификации «Measured» запасов. Например, на никелевом месторождении Рокис Ревард, в Западной Австралии, «Measured» запасы классифицировались по небольшим объемам руды, соответствующим норме месячного производства. Еще более строгие требования для классификации запасов по категории «Measured» были отмечены на одном из бокситовых рудников. На этом предприятии добытая и обогащенная руда отгружалась баржами. По контракту, спецификация руды и оплата определяется для каждой баржи и при превышении допустимых содержаний вредных примесей в руде, загруженной на баржу компания штрафуется и должна выплачивать неустойку. Поэтому требования к геологоразведочным работам были составлены так, чтобы «Measured» запасы были достоверно оценены в блоках, соответствующих объему одной баржи, что составило примерно 3 – 4 недели добычи рудника. Данные примеры показывают, что для классификации запасов (ресурсов) по категории «Measured» объемы руды должны определяться из конкретных рисков данного проекта, это может быть, например, размер баржи как на вышеупомянутом руднике. По опыту автора, объемы руды для классификации «Measured» ресурсов обычно находятся в интервале от 1 до 3 месяцев добычи.

Требования для классификации запасов по категории «Inferred» тоже недостаточно разработаны. Частично это вызвано ошибочным представлением, бытующим в горной индустрии, что поскольку «Inferred» ресурсы по определению являются приблизительной оценкой, не пригодной для детальных ТЭО, то нецелесообразно вводить строгие ограничения допустимой ошибки. Ошибочность этого мнения очевидна, поскольку без оценки рисков, то есть без знания допустимой ошибки, буровая сеть выбирается по субъективным критериям. Как следствие, достоверность оценки может оказаться недостаточной для принятия решения о целесообразности продолжения геологоразведочных работ. Автор считает, что для «Inferred» ресурсов также должны использоваться объективные критерии и предлагает рассчитывать их в объеме руды, которая потребуется для погашения капиталовложений в проект (pay back period).

Проанализировав на примере конкретных месторождений современные методы классификации запасов, автором была предложена следующая, усовершенствованная, методика. Критерии для определения категории запасов определяются для каждого проекта, исходя из его технических и экономических характеристик, в этом состоит принципиальное отличие его метода от других нестатистических методов классификации. Метод предложенный автором в обобщенном виде выглядит так:

Осуществляется экономическая оценка проекта и по ее результатам выбирается допустимая ошибка, которая равняется разнице между средним содержанием в руде и его минимально допустимым значением. Например, на упомянутом выше месторождении бокситов допустимая ошибка составила +/- 10 % (CL 0.95) для содержания алюминия и кремния.

Из анализа рисков определятся объем руды, для которого рассчитывается эта ошибка. Для данного бокситового месторождения были выбраны следующие параметры:

- «Measured» - объем руды равный 1 месяцу добычи на руднике;
- «Indicated» - объем руды равный 1 году добычи на руднике;
- «Inferred» - объем руды равный необходимый для погашения инвестиций (примерно 4 года добычи на руднике).

Месторождение разделяется на блоки, соответствующие объемам руды необходимым для классификации запасов. В нашем примере это 1 месяц, 1 год и 4 года добычи.

Методом «conditional simulation» создаются математические модели буровых сетей

Используя каждую из полученных буровых сетей рассчитываются запасы месторождения и вычисляется степень ее достоверности, то есть определяется ошибка.

Буровая сеть считается приемлемой, если полученная ошибка меньше или равна ее минимально допустимому значению.

По этой методике были классифицированы запасы на многих месторождениях в Австралии, Африке и в Иордании (Abzalov, 2016).

Пример использования метода. Применение предложенных автором критериев классификации показано в этом разделе автореферата на примере одного из месторождений бокситов, расположенного на севере Австралии.

Буровые сети, которые предлагались для разведки месторождения включали 20x20, 50x50, 70x70, 100x100, 150x150, 200x200 и 300x300 м. Требовалось найти какая сеть потребуется для оценки ресурсов по категории «Measured».

По экономическим показателям этого рудника было установлено что допустимая ошибка составляет +/- 10 % (CL 0.95).

Также было установлено, что ошибка, для классификации ресурсов по категории «Measured» должна определяться в объеме руды соответствующей месячной добычи. Поэтому, месторождение было разделено на блоки, соответствующие месячной добычи рудника.

После этого выбиралась буровая сеть и методом SGS рассчитывались средние содержания металла в месячных блоках руды и величина ошибки расчетов (см. рис.16). Эти расчеты были сделаны для каждой буровой сети: 20x20, 50x50, 70x70, 100x100, 150x150, 200x200 и 300x300 м., следовательно, для каждого блока было получено 7 значений ошибки, соответствующих 7 буровым сетям (см. рис.16).

Для каждой буровой сети рассчитывается средняя ошибка, которая наносится на график против размера буровой сети (см. рис.17).

По этой диаграмме выбирается буровая сеть для классификации запасов (см. рис.17). Оптимальной считается наиболее широкая буровая сеть, при которой средняя величина ошибки не превышает допустимый для данной категории порог (то есть равна или меньше порогового значения). Пример показанный на рисунке 17 показывает, что для данного месторождения для оценки запасов по категории «Measured» потребуется геологоразведочное бурение по сети 30 х 30м.

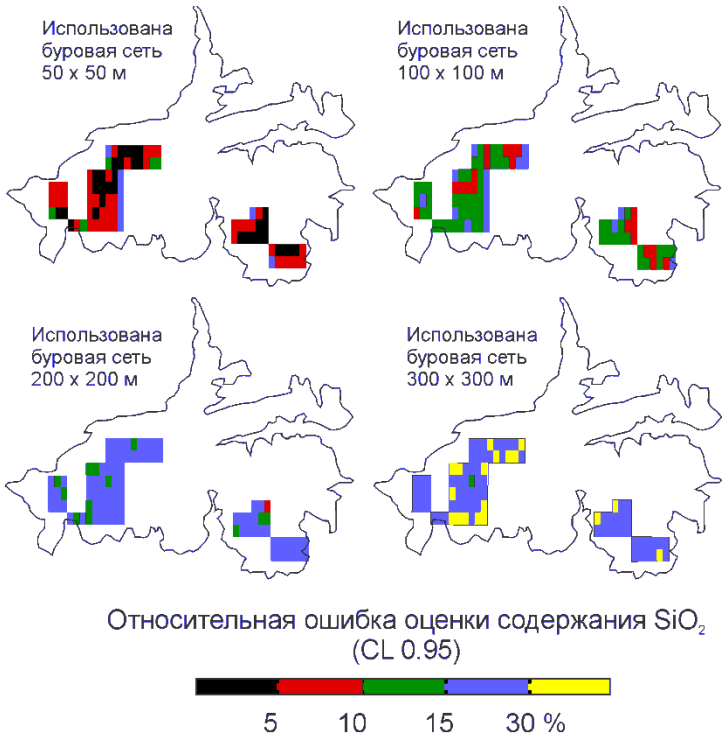


Рис. 16. Ошибка в оценке среднего содержания SiO_2 примеси в бокситах, рассчитанная по блокам соответствующим месячному объему добычи на месторождении Гов, Австралия.

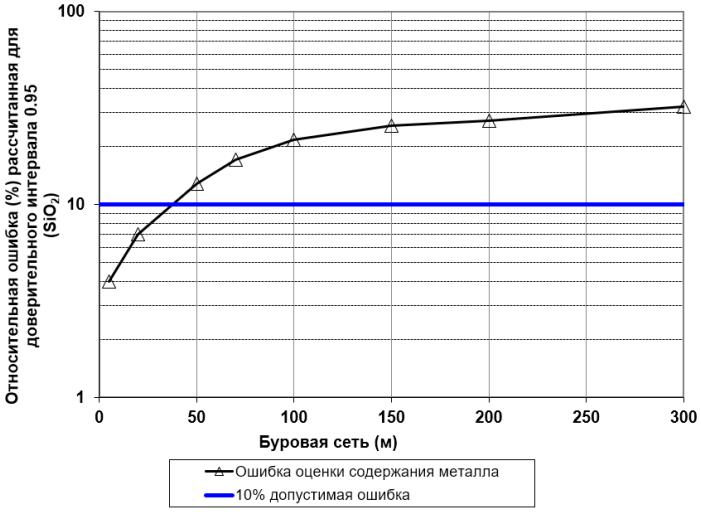


Рис. 17. График зависимости достоверности запасов от геологоразведочной сети. По ординате отложена ошибка среднего содержания SiO_2 (вредная примесь) в месячном объеме руды, по абсциссе – размер буровой сети

Седьмая глава «Представительность технологической (крупно-объемной) пробы» рассматривает металлургические (технологические)

характеристики руды, определяющиеся технологическими испытаниями, выполненными используя крупно-объемные пробы. По результатам технологических испытаний выбирают методы переработки руды оптимальные для данного проекта, а также оценивают процент извлечения металлов и определяют экономические показатели производства. Таким образом, крупно-объемные пробы являются первыми достоверными данными для оценки металлургических характеристик руды, которые затем уточняются на стадии полупромышленного производства.

Точность технико-экономических оценок (ТЭО) горнорудного проекта существенно зависит от представительности крупно-объемных проб для данного месторождения. Общепринято, что каждый технологический тип руды опробывается и анализируется отдельно, но при этом участки для отбора проб часто выбираются необоснованно и руководствуясь субъективными критериями.

Автор, разрабатывая ТЭО кондиций для железорудного проекта в Австралии, отметил необходимость выработки объективных критериев представительности технологических проб. Итогом этих работ стала новая методика, которая предлагает оценивать пригодность крупно-объемной пробы по двум критериям (Abzalov, 2016):

- Статистический анализ распределения искомых компонентов. Для получения представительной пробы необходимо добиться соответствия статистических характеристик технологической пробы блочной модели месторождения.
- Анализ пространственного распределения крупно-объемных проб. Пригодной считается схема опробования при которой все месторождение охвачено сетью опробования.

Статистический анализ представительности технологической пробы. Статистическая представительность пробы анализируется путем ее сравнения с гистограммами блочной модели, которые отображают основные металлургические характеристики данного рудного тела, включая содержание рудных компонентов и вредных примесей. Гистограмма блочной модели должна быть геостатистически преобразована на размер блоков равных минимальной селективно извлекаемой ячейки (SMU). В геостатистике данное преобразование математически описывается как соотношение «дисперсия – объем» (volume-variance relationships) и осуществляется, используя методы нелинейной геостатистики, например, метод LUC (Abzalov, 2006), описанный в предыдущей главе автореферата где был обобщен в формуле (5.8). Технологическая проба считается статистически представительной если, ее статистическое распределение совпадает с гистограммой SMU (см. рис. 18, а).

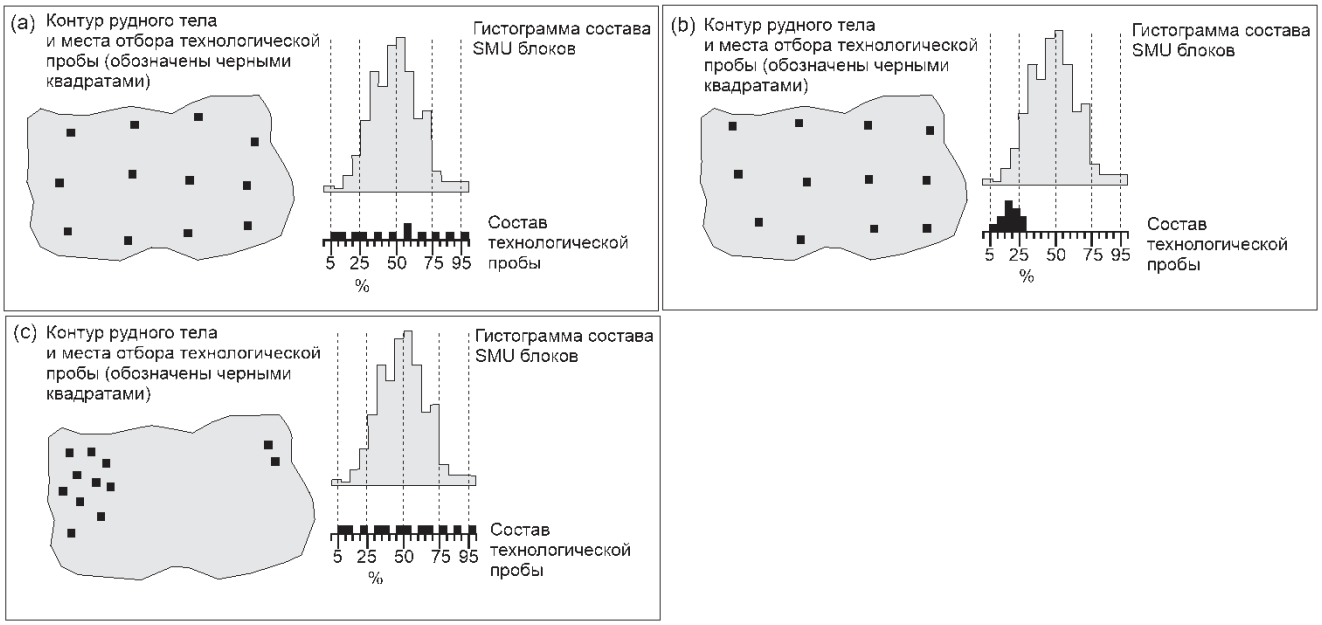


Рис. 18. Диаграмма, схематично показывающая отличие представительной крупно-объемной пробы от непредставительной:
(a) представительная проба; (b) пространственное распределение пробы представительное, но проба не представительна по составу;
(c) представителен химический состав пробы, но пространственное распределение участков опробования не представительно.

Требования к пространственному распределению технологической пробы. При выборе участков опробования необходимо добиться максимально представительного распределения проб в объеме рудного тела, с таким расчетом, чтобы пробы были равномерно распределены по месторождению и материалы разных участков представлены в технологической пробе (или пробах) (см. рис. 18, a-b). Необходимо избегать кластеризации опробования на небольших участках (см. рис. 18, c).

Применение методики на железорудном месторождении в Западной Австралии. Данная методика была изначально применена на железорудном месторождении в Западной Австралии где для оценки металлургических характеристик руды были пробурены 22 скважины (см. рис. 19). Скважины задавались специально для отбора технологических проб и размещены максимально равномерно в площади месторождения. Несколько скважин было пробурено на участках забалансовых руд. (см. рис. 19). Для оценки представительности состава технологических проб были построены гистограммы содержаний железа и основных вредных примесей, Al_2O_3, SiO_2, LOI и P в пробе которые сравнивались с гистограммами содержаний этих элементов в блочной модели месторождения (см. рис.20). Для сравнения гистограммы были преобразованы согласно геостатистичекому правилу взаимосвязи «дисперсия – объем» (volume-variance relationships) на размер блоков SMU. По результатам сравнительного анализа двух статистических выборок было показано, что состав технологической пробы достоверно отражает вариации содержаний Fe, Al_2O_3, SiO_2 и других компонентов в руде. После подтверждения представительности

крупно-объемных технологических проб они были использованы для металлургических испытаний руды.

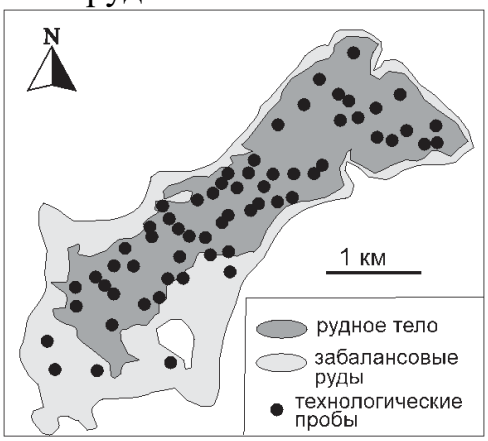


Рис.19. Участки отбора технологических проб на железорудном месторождении в Западной Австралии.

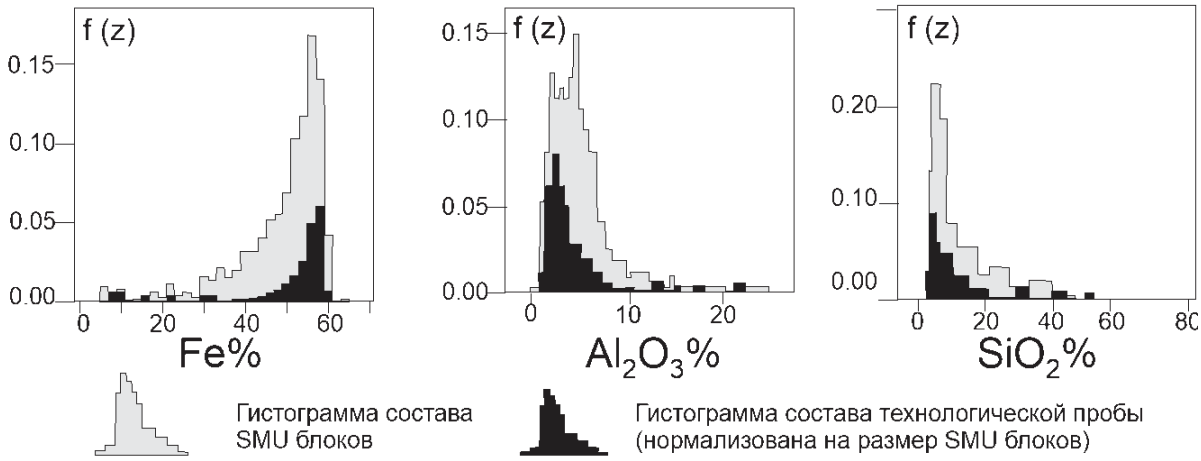


Рис.20. Сравнение составов технологических проб и блочной модели на гистограмме. Обе статистические выборки трансформированы на размер блоков SMU.

ВЫВОДЫ

Проведенные автором исследования убедительно показали, что методы нелинейной геостатистики оптимально подходят для создания единой методологической системы рудничной геологии, отвечающей современным требованиям горной индустрии. В основу единой методологической системы легли новаторские методы автора:

1. Критерий CV%, предложенный автором для контроля качества проб позволяет количественно оценить геологические и лабораторные факторы ошибки опробования и на этой основе выбрать оптимальные соотношения между сетью опробования и методикой пробоподготовки;
2. Показано, что, используя индикаторные вариограммы, рудные тела можно математически оконтуривать по величине вероятности заданного геостатистического индикатора;

3. Автором разработан новый метод подсчета запасов «LUC», позволяющий рассчитывать распределение полезного компонента в блочную модель. Метод не нарушает статистических отношений между дисперсией изучаемой переменной и размером блоков, что позволяет рассчитывать распределение запасов по небольшим селективно отрабатываемым блокам и не требует чрезмерного сгущения буровой сети.
4. Разработана новаторская методика классификации запасов по степени риска возможной ошибки, которая рассчитывается из нормы прибыли проекта.

Разработанные методики не являются узкоспециализированными технологиями и успешно применялись на различных типах месторождений, от жильного золота до крупно-объемных типов, включая медно–порфировые и железорудные месторождения.

Многие авторские разработки, например, LUC, CV%, уже внедрены в практику и широко используются международными горнорудными корпорациями.

В заключении отмечу, что к сожалению формат диссертации не позволяет включить все полученные автором результаты, поэтому автореферат содержит только главные методические разработки автора. Дополнительную информацию и другие практические рекомендации можно найти в публикациях М.Абзалова список которых приложен к автореферату. Наиболее полное описание предложенной системы геологоразведочных работ содержится в его монографии “Applied Mining Geology”.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Разработанные автором методы классификации запасов, основанные на оценке рисков, должны быть рассмотрены комитетами по запасам руды и, по мнению автора, заслуживают скорейшего внедрения в практику.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. **Abzalov, M.Z.** Applied Mining Geology. Modern Approaches in Solid Earth Sciences 12 / M.Z.Abzalov. - Berlin: Springer, 2016. – 448 с.
2. **Abzalov, M.Z.** Geostatistical criteria for choosing optimal ratio between quality and quantity of the samples: method and case studies. / M.Z. Abzalov // Mineral Resource and Ore Reserves Estimation, AusIMM Monograph 23. - Melbourne: AusIMM, 2014. – С. 91-96.
3. **Abzalov, M.Z.** Quality Control of Assay Data: A Review of Procedures for Measuring and Monitoring Precision and Accuracy. / M.Z.Abzalov // Exploration and Mining Geology, 2008. -17. - No 3-4. - С.1-14.
4. **Abzalov, M.Z.** Localised Uniform Conditioning (LUC): a new approach for direct modelling of small blocks. / M.Z. Abzalov // Math. Geol. - 2006. - 38. - No 4. - С. 393-411.
5. **Abzalov, M.Z.** Geostatistically assisted domaining of structurally complex mineralisation: method and case studies. / M.Z. Abzalov, M. Humphreys // The

AusIMM 2002 Conference: 150 years of mining, Publication series No 6/02. - Melbourne: AusIMM, 2002. - С. 345-350.
6. **Annels, A.E.** Mineral deposit evaluation, a practical approach. / A.E.Annels. - London: Chapman and Hall, 1991. - 436 с.
7. **Arik, A.** An alternative approach to resource classification. / A.Arik // APCOM Proceedings of the 1999 Computer Applications in the Mineral Industries (APCM) symposium. - Colorado: Colorado School of Mines, 1999. - С. 45-53.
8. **Blackwell, G.** Relative kriging error – a basis for mineral resource classification. / G.Blackwell // Exp. Min. Geol., 1998. -7. - No 1-2. - С. 99-105
9. **David, M.** Geostatistical ore reserve estimation. /M. David. Amsterdam: Elsevier, 1977. – 364 с.
10. **Davis, B.** Confidence interval estimation for minable reserves. / B.Davis. - Colorado: Colorado School of Mines. -1992. -No 39. – 7 с.
11. **Dimitrakopoulos, R.** Orebody uncertainty, risk assessment and profitability in recoverable reserves, ore selection and mine planning: Workshop course. / R.Dimitrakopoulos. - Brisbane: The University of Queensland, 2002. - 304 с.
12. **Francois-Bongarcon, D.** The practise of the sampling theory of broken ore. / D.Francois-Bongarcon // CIM Bulletin, 1993. - 86. - No 970. - С.75 - 81
13. **Gy, P.** Sampling of particulate materials, theory and practice: Developments in Geomathematics 4 / P. Gy. -Amsterdam: Elsevier, 1979. - 431 с.
14. JORC Code // Australaisian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves. -Melbourne: AusIMM, 2012. - 44 с.
15. **Journel, A.G.** Mining geostatistics. / A.G. Journel, C.J. Huijbregts. – New York: Academic Press, 1978. - 600 с.
16. **Lantuejoul, C.** On the importance of choosing a change of support model for global reserves estimation. / Lantuejoul, C. // Math. Geol., 1988. - 20. - С.1001-1019.
17. **Матерон, Г.** 1968: Основы прикладной геостатистики. / Г. Матерон. -Москва: Мир. - 1968. - 408 с.
18. **Pitard, F.F.** Pierre Gy's sampling theory and sampling practise. 2nd edition. / F.F.Pitard. -New York: CRC Press, 1993. - 488 с.
19. Plurigaussian simulation in geosciences, 2nd edn. / M.Armstrong, A.Galli, H.Beucher и др. -Berlin: Springer, 2011. -149 с.
20. **Schofield, N.A.** Determining optimal drilling densities for near mine resources. / N.A. Schofield // Mineral Resource and Ore Reserves Estimation. The AusIMM Guide to Good Practice, -Melbourne: AusIMM, 2001. - С. 293 - 298.
21. **Strebelle, S.** Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics. / S. Strebelle. Math. Geol. - 2002. - 34. С.1-22.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации автором опубликовано более 50 работ. Основные работы приведены ниже.

1. **Abzalov, M., Djenchuraeva, R., Alpiyev, Ye., and Abzalov, S.N.** The geology of the Bozymchak Cu-Au skarn deposit, Tien Shan belt, Central Asia: emphasis on the geochemical characteristics of the granitoids. Applied Earth Science (Trans. Inst. Min.

Metall. B), 2019. - 128, No 3, - C.106-123. Режим доступа: //www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/25726838.2019.1634897
2. **Abzalov, M.Z.** Applied Mining Geology. Modern Approaches in Solid Earth Sciences 12 / M.Z.Abzalov. - Berlin: Springer, 2016. – 448 с. Режим доступа: https://www.springer.com/gp/book/9783319392639
3. **Abzalov, M.Z.** Geostatistical criteria for choosing optimal ratio between quality and quantity of the samples: method and case studies. / M.Z.Abzalov // Mineral Resource and Ore Reserves Estimation, AusIMM Monograph 23. -Melbourne: AusIMM, 2014. – С. 91 - 96.
4. **Abzalov, M.Z.** Design principles of relational databases and management of dataflow for resource estimation. / M.Z.Abzalov // Mineral Resource and Ore Reserves Estimation, AusIMM Monograph 23. - Melbourne: AusIMM, 2014. – С. 47-52.
5. **Abzalov, M.Z.** Localised Uniform Conditioning: method and application case studiesю / M.Z.Abzalov // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. - 2014. -114. - С.1-6. Режим доступа: https://www.saimm.co.za/Journal/v114n03p205.pdf
6. **Abzalov, M.Z.** Measuring and modelling of the dry bulk density of the rocks for the mineral resource estimation. / M.Z.Abzalov // Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B). - 2013.-122.-No 1. - С.16 – 29. Режим доступа: //www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743275813Y.0000000027
7. **Abzalov, M.Z.** Quality Control of Assay Data: A Review of Procedures for Measuring and Monitoring Precision and Accuracy. / M.Z.Abzalov // Exploration and Mining Geology. -2008. -17. -No 3 - 4. - С. 1-14. Режим доступа: https://store.cim.org/en/quality-control-of-assay-data-a-review-of-procedures-for-measuring-and-monitoring-precision-and-accuracy
8. **Abzalov, M.Z.** Zarmitan granitoid-hosted gold deposit, Tian Shan Belt, Uzbekistan. / M.Z.Abzalov // Economic Geology. - 2007. - 102. - No 3. С. 519-532. Режим доступа: https://pubs.geoscienceworld.org/segweb/economicgeology/article/102/3/519/127871/
9. **Abzalov, M.Z.** Localised Uniform Conditioning (LUC): a new approach for direct modelling of small blocks. / M.Z.Abzalov // Math. Geol., - 2006. - 38. -No 4. -С. 393 - 411. Режим доступа//link.springer.com/article/10.1007/s11004-005-9024-6
10. **Abzalov, M.Z.** Geostatistically assisted domaining of structurally complex mineralisation: method and case studies. / M.Z.Abzalov, M.Humphreys // The AusIMM 2002 Conference: 150 years of mining, Publication series No 6/02. - Melbourne: AusIMM, 2002. - С. 345 - 350. Режим доступа// https://www.ausimm.com/publications/conference-proceedings/2002-ausimm-new-zealand-branch-annual-conference---150-years-of-mining/geostatistically-assisted-domaining-of-structurally-complex-mineralisation-method-and-case-studies/
11. **Abzalov, M.Z.** Chrome-spinels in gabbro-wehrlite intrusions of the Pechenga area, Kola Peninsula, Russia: emphasis on alteration features. / M.Z.Abzalov // Lithos. -1998. -43. - No 3. С.109 - 134. Режим доступа: //www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002449379800005X

РЕЗЮМЕ

диссертации Абзалова Марата Зайнутдиновича на тему: «Современные принципы организации и методология геолого-разведочных работ при освоении горно-рудных проектов и их последующей эксплуатации (Прикладная Рудничная Геология)» на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.11- геология, поиски и разведка месторождений твердых полезных ископаемых, минерагения

Ключевые слова: рудничная геология, геостатистика, оценки рисков, классификация запасов, 3-х мерные модели.

Цель исследования: создание новой системы математических методов для сбора и анализа геологоразведочных данных и построения 3х мерных моделей рудных тел. Методологической основой этой системы стали методы нелинейной геостатистики и стохастические (вероятностные) модели.

Методы исследования: в работе использованы методы нелинейной и непараметрической геостатистики, включая новые методы, разработанные автором для оконтуривания рудных тел, заверки качества опробования и подсчета запасов, а также методы стохастического моделирования.

Полученные результаты и новизна: Впервые было показано, что с помощью метода «LUC» можно рассчитывать распределение запасов по небольшим селективно отрабатываемым блокам. Метод не требует чрезмерного сгущения буровой сети.

Автор одним из первых предложил методику оконтуривания рудных тел, используя вероятностную оценку геостатистических индикаторов.

Новой разработкой является критерий CV%, предложенный автором для контроля качества проб и количественного сопоставления геологических и лабораторных факторов ошибки опробования.

Разработана новаторская методика классификации запасов по степени риска ошибки, превышающей доверительный интервал, который определяется по норме прибыли проекта.

Разработанные автором критерии отбора крупно-объемных проб тоже новаторские и позволяют более точно оценить представительность пробы для технологических испытаний.

Рекомендация по использованию: Разработанные автором методы заслуживают внедрения в практику. Революционный прорыв может быть достигнут использованием метода «LUC» для подсчета запасов с последующей их классификацией по методике автора.

Область применения: работы автора наиболее применимы при освоении горнорудных проектов, в первую очередь для подсчета запасов месторождений и оценки рисков. Отметим, что многие разработки автора уже внедрены в производство и широко используются горнорудными компаниями.

Марат Зайнутдинович Абзаловдун 25.00.11 - геология, катуу кен байлыктарды издоо жана чалгындоо, минералдык адистиги боюнча геолого- минералогиялык илимдеринин доктордук даражасынын алуу үчүн жазылган "Тоо-кен долбоорлорду иштеп чыгуудагы жана аларды келечекте иштүүдөгү геологиялык чалгындоо иштеринин заманбап уюштируу принцинтери жана методологиясы (Колдонмо рудалык геологиясы)" аттуу доктордук диссертациясынын:

РЕЗЮМЕСИ

Ачкыч сөздөр: тоо-кен геологиясы, геостатистика, тобокелдиктерди анализдөө, минералдык ресурстардын классификациясы, 3D моделдери.

Изилдөөнүн максаты: чалгындоо маалыматтарын чогултуудан жана анализ жүргүзүүдөн тартып, 3D руда мейкиндигин боюна моделдерди курууга чейинки аралыкты камтыган математикалык методдордун инновациялык тутумун түзүү. Система сызыктуу эмес геостатистиканын методдорун стохастикалык (ыктымалдык) моделдер менен айкалыштырат.

Изилдөөнүн методдору: сызыктуу эмес геостатистикалык изилдөөдө жана параметрдик эмес ыкмалар, анын ичинде автордун рудалык телолордун контурун аныктоо, алардын сапатын камсыздоону жана запастарын баалоону иштеп чыгуу үчүн иштелип чыккан жаңы ыкмалары колдонулат, андан сырткары стохастикалык моделдери кеңири колдулган.

Негизги ачылыштар жана жаңылыгы: биринчи жолу "LUC" ыкмасын колдонуу менен минералдык ресурстарды селективдүү блокторго бөлүп көрсө болот. Ыкманы бургулоочу торго ашыкча толтурбай эле колдонсо болот.

Автор биринчилерден болуп рудалык телого геостатистикалык индикатор жардамы менен божомолдоо баалоону колдонуп кендин чегин аныктоо ыкмасын сунуштаган.

Маалыматтардын сапатын контролдоо үчүн автор сунуш кылган CV% критерийи инновациялык мүнөзгө ээ жана үлгүлөрдүн тактыгына таасир этүүчү геологиялык жана лабораториялык факторлорду сандык анализдөө үчүн колдонулушу мүмкүн.

Биринчи жолу ресурстарды баалоодо долбоордун кирешине норма катары аныкталган запастык классификациясына ыкма иштелип,ал ишенимдуу интервалдын ката тобокелчилигиннен басым кылат.

Үлгүлөрдү чогултуунун критерийлери дагы новатордук мүнөзгө ээ жана чоң-көлөмдүү пробалар үлгүлөрүн так баалоого мүмкүнчүлүк берет.

Колдонуу үчүн сунуштар: автордук ыкмалар практикалык жүзөгө ашыруу татыктуу. "LUC" ыкмасын колдонуу менен революциялык жетишүүгө болот, ал алардын запастарын аныктоого жана классификациялоо керек.

Колдонуу чөйрөлөрү: автордун сунуштары тоо-кен долбоорлорун иштеп чыгууга, айрыкча баалоо жана тобокелдиктерди баалоо үчүн ылайыктуу. Тактап айтканда, бул иштин көптөгөн натыйжалары тоо-кен тармагында ишке ашырылып, кен казып алуучу компаниялар тарабынан кеңири колдонулуп келе жатат.

SUMMARY

Doctoral thesis of Marat Zainutdinovich Abzalov: "Modern principles and methodology of exploration during development of the mining projects and geological support of the operating mines (Applied Mining Geology)" submitted for consideration of the Doctor of Geology and Mineralogical Sciences degree, on the speciality "25.00.11 – Geology, prospecting and exploration of the mineral deposits, mineral systems".

Key words: mining geology, geostatistics, risk analysis, mineral resource classification, 3D ore body models.

Scope of study: creating an innovative system of the mathematical methods spanning a range from the numerical exploration data capturing and analyses to construction of the 3D ore body models. The system utilises methods of non-linear geostatistics coupled with stochastic (probabilistic) models.

Study methods: the study uses methods of non-linear geostatistics and non-parametric techniques, including the new techniques developed by the author for delineating the mineralised bodies, data quality assurance and the mineral resource estimation. The study also widely uses the different probabilistic models of the regionalised variables coupled with methods of stochastic simulation.

Main findings and their novelty: the obtained results are essentially novel, providing solutions that was not available before.

For the first time was shown, that using the method "LUC" the mineral resource can be estimated into small blocks. The method can be applied without excessive infilling of the drill grid.

Author was one of the first who has proposed to delineate ore bodies in 3D space using probabilistic estimate of the grade indicators.

The criterion CV%, proposed by the author for the data quality control, is innovative and can be used for quantitative analysis of the geological and laboratory related factors affecting the samples precision.

For the first time was shown that the resource can be classified by risk of the estimation error exceeding the tolerance interval which is inferred from the profit margin of the project.

The criteria of the bulk sample collection are also innovative and allow more accurately assess representativity of the bulk samples for metallurgical tests.

Recommendations: the author's methods shell be considered for practical implementation. The breakthrough can be achieved by application of the method "LUC" for resource estimation that should be followed up by their classification using the author's classification scheme.

Application areas: the presented work is well suited for the mining projects development, in particular for evaluation and risk assessment. In fact, many results of this work are already implemented in the mining industry and widely used by the mining companies