

ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГРАММЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОВЕДЕНИЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ

Сергей Николаевич Гончаренко

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 119049, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, 4, доктор технических наук, профессор кафедры АСУ, тел. (499)230-28-11, e-mail: gs16@mail.ru

Целью работы является формирование программы контроля качества проведения геологоразведочных работ на месторождении и геологический контроль оценки минеральных ресурсов. В основу исследования положено моделирование и интерпретация содержаний полезного компонента и литологии месторождения. Оценка содержаний производилась методом ординарного кригинга. Проведено обоснование верхних и нижних пределов содержаний полезного компонента на основе данных лабораторных исследований методами статистического анализа. Оценка содержаний завершалась путем статистического сравнения данных бурения с визуальными оценками основных направлений содержаний по данным моделирования. Учтены релевантные факторы, определяющие степень выдержанности геологических структур и категорийность запасов месторождения. Установлены литологические особенности, определяющие перспективные зоны минерализации. Реализованы процедуры проверки качества данных в целях мониторинга загрязнения, достоверности и точности анализов. Реализована процедура определения факторов, негативно влияющих на выдержанность содержаний и параметры геологических характеристик. Произведена разработка и заверка блочной модели месторождения и осуществлено сравнение объема полезного компонента блочной модели с объемами сформированных каркасов. В результате проведенных исследований осуществлена классификация запасов, учитывающая исходное множество имеющихся данных по геологическим структурам месторождения, аналитические данные опробования и содержание полезного компонента.

Ключевые слова: контроль качества данных, пробоподготовка, блочная модель месторождения, выдержанность

Введение

Качество данных, собранных в ходе проведения разведочных работ, зависит от выбора методик отбора, подготовки и анализа проб, а также от реализации программы по контролю качества [1–5]. Программы контроля качества используются на всех стадиях геологоразведочных работ, включая подготовительный период полевого обследования, бурение, отбор проб всех видов, подготовку и анализа проб, определение плотности проб, сбор геотехнической информации, перевод данных в цифровую форму,

хранение данных и другие виды сопутствующих работ [6–8]. Контроль любой программы опробования может отслеживаться посредством ряда мер, которые включают (но не ограничиваются) внедрение холостых проб (бланков), стандартных проб с известными содержаниями и различных дубликатов проб [9–15].

Методология проведения исследования

В процессе подготовительного периода и полевого обследования были исследованы пункты государственной геодезической сети

имеющихся каталогов координат, необходимых для дальнейшего выполнения работ по геологическому опробованию. В период рекогносцировочных работ были обследованы необходимые исходные пункты планово-высотной геодезической основы, расположенные в полосе производства работ. Обследование пунктов государственной геодезической и нивелирной сетей выполнялось с целью проверки их сохранности на местности, технического осмотра и оценки возможности использования для развития заполняющей опорной сети и сети съемочного обоснования. Закладка пунктов осуществлялась в несколько этапов: предварительное распределение пунктов по площади работ, рекогносцировка и определение типа закладываемого центра, закладка пунктов, выполнение внешнего оформления.

Непосредственные измерения произведены в два этапа. На первом этапе было выполнено измерение контрольных пунктов геодезической сети, точек съемочного обоснования, необходимых для выполнения наземной топографической съемки. Все измерения выполнены при помощи спутникового навигационного оборудования: GPS-системы геодезического класса, работающей в режиме реального времени, и одного комплекта усилителя для увеличения радиосигнала. Измерения выполнялись в режиме кинематики и stop-and-go-измерения, которые являются наиболее эффективными способами быстрого и точного определения большого количества точек. В качестве исходных пунктов при развитии съемочной геодезической сети (пунктов съемочного обоснования) были использованы пункт триангуляции Государственной геодезической сети, а также пункты полигонометрии, сохранившиеся на площади 0,6 км². От этих пунктов на территорию района работ были переданы значения координат и высот, в дальнейшем ставшие исходными (базовыми) для последующего выполнения топографической съемки. В дальнейшем от этих пунктов выставлялись (по необходимости) пункты съемочной сети для тахеометра. Цифровые данные загружались в систему AutoCAD, где создавалась цифровая модель местности и отрисовка ситуации с исполь-

зованием действующих условных знаков для топографических планов масштаба 1 : 2 000. Вся ситуация наносилась в соответствии с полевыми абрисами.

Таким образом, цифровые планы, выполненные в подобной постановке, могут быть в полной мере использованы в качестве обеспечения информационной и топографической основы, при принятии технических решений в процессе планирования и реализации мероприятий, направленных на обеспечение оперативных решений и процесса геологического опробования.

Проектные точки устьев геологических скважин выносились инструментально на местность, и определялась возможность бурения из данной точки. В положительном случае начинается подготовка площадки для бурения. В противном случае выбирается новое место для скважины, но, в любом случае, место заложения определяется из соображений минимизации расстояния между расположением фактического и проектного устья. После завершения бурения фактические координаты скважины снимались инструментальным методом (тахеометр или другое геодезическое оборудование с высокой точностью съемки). Используемая система координат прямоугольная, условная.

Проверка качества топографической выноски проектных точек осуществлялась на 25 точках. Выноска скважин производилась тахеометром. По результатам обработки данных контрольной привязки скважин погрешность в плане составила от 0,04 до 0,99 м. Общая среднеквадратическая погрешность составила 0,48 м. Полученное значение погрешности выноски можно считать удовлетворительным с учетом требований, применимых к геологоразведочным работам.

Некоторые точки заложения скважин были перенесены с проектных мест из-за условий местности, таких как: подтопленные участки (болота), лес, крутой склон или борт карьера. В результате максимальное смещение относительно проектных координат составило 53 м. Однако за счет изменения зенитного угла и азимута параметры разведочной сети удалось выдержать, как показано на рис. 1.

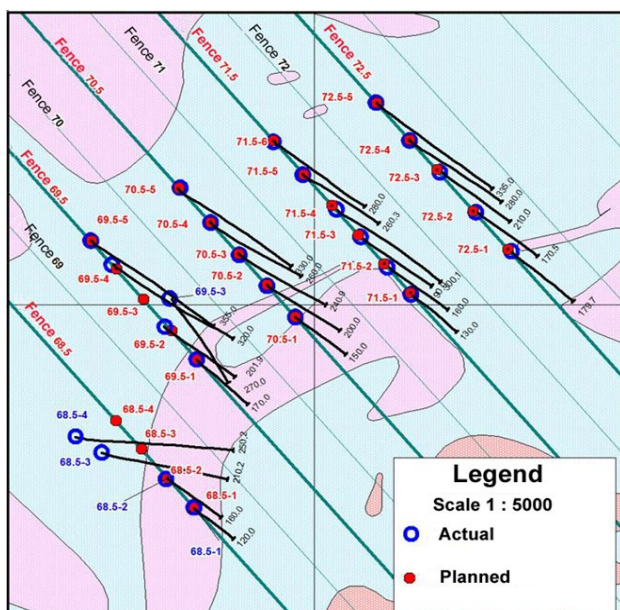


Рис. 1. Местоположение скважин (красный цвет – проектные, синий – фактические)

Буровые работы на месторождении проводились с использованием усеченной системы координат, но с применением вращающейся сети. На рисунке показано местоположение скважин на исходной сети.

Для проведения работ был осуществлен перевод местоположения скважин в условную локальную систему координат. Центральной точкой перевода и вращения была выбрана условная скважина. Изучение «Центрального» участка буровыми работами проводилось на протяжении 1,3 км по простиранию участка. На большей части указанного расстояния по простиранию бурение осуществлялось по профилям длиной до километра вертикальными скважинами.

Наиболее интенсивно участок разбуривался в центре, где плотность сети вертикальных скважин в основном составила 50 м на восток и 25 м на север, с небольшими секциями 12,5 м × 12,5 м (рис. 2).

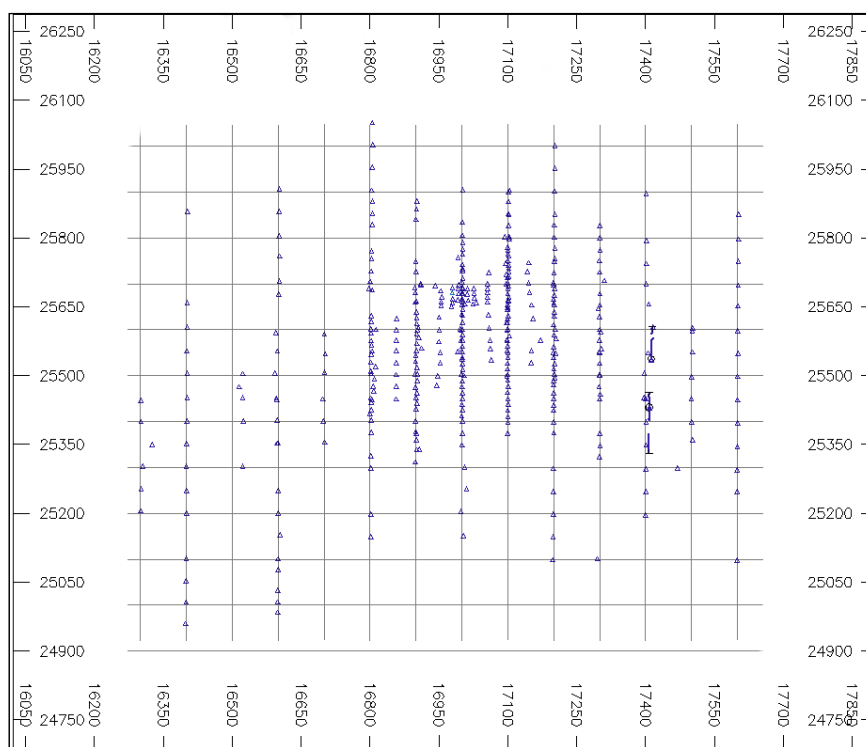


Рис. 2. Местоположение буровых скважин на локальной сети месторождения

Замеры скважин производились с помощью инклинометров с интервалом от 36 до 5 м. По отснятым скважинам допускалось отклонение направления скважины до 5 градусов и до 30 минут по азимуту. Такие допуски по углу бурения достаточно большие, в ре-

зультате этого отклонение может составить 10–11 м в скважине глубиной 60 м и до 35 м в 200-метровой скважине.

Вся документация относительно координат буровых скважин, данных инклинометрии, опробования и результатов анализов

велась в базе данных Access. Все буровые скважины бурились вертикально согласно традиционной методологии, все устья тщательно фиксировались съемкой. Геологическая документация составлялась перед опробованием опытным полевым персоналом.

После геологического документирования полевым персоналом были опробованы рудные интервалы в скважинах, средний интервал опробования при этом составил один метр. Отобранные пробы затем были отправлены на пробоподготовку и анализ в лабора-

тории. Далее производилось оконтуривание объемных рудных тел с использованием цифровых каркасных моделей (рис. 3).

При этом минерализация была разделена на зону приповерхностной минерализации (так называемую кору выветривания) для открытой разработки и зону первичных руд для подземной добычи на глубину 600 м. Эти две зоны затем были разделены на рудные в зависимости от их принадлежности к трем основным рудным участкам: «Северо-восточному», «Юго-западному» и «Центральному» (см. рис. 3).

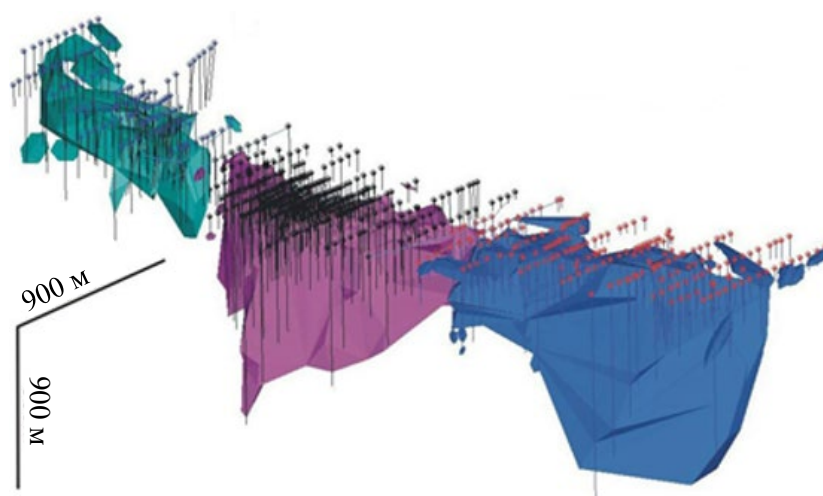


Рис. 3. Пространственная интерпретация оруденения с помощью каркасных моделей

Объемы в пределах каркасов были разбиты на полигональные блоки на основании разрезов. Интерполяция содержаний и тоннажа в данные блоки проводилась посредством простого расчета объема и средневзвешенного содержания. Затем все рудные зоны и интервалы объединялись для выведения общего показателя ресурсов и проведения этапа геологического опробования.

Для месторождения предложены процедуры опробования, подготовки проб и их анализа с использованием следующих контрольных проб: геологический дубликат, отбираемый из второй половинки керна рядовой пробы; дубликат порошка крупностью 1 мм, получаемого после первой стадии пробоподготовки; дубликат порошка, получаемого после второй стадии пробоподготовки; один бланк; один стандарт.

Процедуры контроля качества отбора проб включают: контроль за правильным нанесением линии распила (симметричностью половинок керна) и качеством фотографий керна для отслеживания симметричности реза, контроль веса рядовой пробы и ее дубликата, контроль представительности проб с помощью сравнения содержания полезного компонента в геологическом (полевом) дубликате и основной пробе.

На этапе отбора проб и формирования партии для отправки в лабораторию пробоподготовки внедряются геологический дубликат и бланк.

Геологический дубликат – это дубликат пробы для определения качества процесса опробования произвольно выбранного интервала (желательно рудного) и для проверки распределения полезного компонента. В качестве

полевого дубликата использовали вторую половинку керна. Различие в содержании полезного компонента полевого дубликата и рядовой пробы может говорить о наличии неравномерности распределения полезного компонента и (или) о нарушении методики отбора пробы (неправильный распил керна) [16–18].

Бланк – это проба с заведомо пустым содержанием. Готовится заранее из породного материала, который был отобран и протестирован.

Для получения материала бланка нужно отобрать валовую пробу пустой породы, аналогичной вмещающим породам на данном месторождении.

На месторождении отсутствуют выходы коренных пород на поверхность, следовательно, не было возможности отобрать валовую пробу. В этой связи в качестве бланка использовался кварцевый песок, химический состав которого был предварительно протестирован.

Качество подготовки пробы проверяется рядом процедур, которые включают контроль за чистотой применяемого оборудования и правильность используемой методики подготовки пробы на каждой стадии: взвешивание, дробление, деление, истирание.

При этом были использованы следующие процедуры контроля качества пробоподготовки: систематическая аттестация соответствующего оборудования (в первую очередь, весы); ситовой контроль на этапе дробления и истирания (проводится работниками лаборатории); контроль бланками – для проверки заражения оборудования; контроль дубликатами дробления – для проверки распределения полезного компонента после дробления и деления.

Кодированная проба бланка поступает в лабораторию пробоподготовки и истирается как рядовая проба. Если аналитические исследования показывают содержание полезного компонента в пробе бланка выше аттестованного (порог обнаружения) в 2–3 раза и выше, то следует выяснять причину (велика вероятность заражения оборудования) и, может быть, сделать повторный анализ партии.

Дубликат дробления отбирается после процесса дробления в соответствии с утвержденным регламентом и схемой отбора. Отбор производит работник лаборатории пробоподготовки. Далее она обрабатывается по той же схе-

ме, что и рядовая проба. При отправке в аналитическую лабораторию ей присваивается кодированный номер. Если содержание полезного компонента в дубликате дробления окажется больше, чем в рядовой пробе на значение, превышающее установленную ошибку, то должна быть установлена причина. Различие может быть вызвано нарушением методики дробления и деления пробы, а также природной неоднородностью распределения золота, а значит, недостаточной гомогенизацией материала пробы.

В процессе подготовки отправки проб (партии проб) внедряются еще две контрольные пробы: дубликат истирания и стандарт, которые применяются для выявления ошибок аналитической лаборатории (оборудование и методы анализа) и поэтому они будут подробно рассмотрены в следующем разделе.

Дубликат истирания отбирается в процессе пробоподготовки на этапе деления после истирания рядовой пробы и кодируется перед отправкой в аналитическую лабораторию. Различие, превышающее установленный предел в содержаниях дубликата истирания и рядовой пробы, требует выяснения причины. Она может быть вызвана ошибкой анализа (загрязнение аналитического оборудования, нарушение методики проведения анализа), нарушением методики истирания и деления при пробоподготовке.

Стандарт-проба внедряется в каждую партию в кодированном виде (1 на 45 рядовых проб) на этапе компоновки проб перед отправкой в аналитическую лабораторию. Стандарт используется для выявления систематической ошибки аналитической лаборатории – установления достоверности определения данной лаборатории. Полученный результат анализа пробы позволяет судить, насколько он близок к аттестованному содержанию стандарта.

Извлечение керна из колонковой трубы производилось буровым мастером или его помощником. Керн извлекался в заранее промытый рабочий лоток, рассчитанный на максимальный буровой рейс 2–2,5 м. Затем керн перекладывали в ящик. На этикетке бурового рейса подписывался номер скважины, глубина от – до, количество пройденных метров и линейный выход керна в метрах.

В период работ керн опробовался на всю длину, включая вмещающие породы краевых частей минерализованных зон, жил и разломов. Опробование производилось исходя из литолого-петрографического состава пород. Средняя длина керновых проб составляла 1,0 м, минимальная 0,3 м, максимальная 1,7 м. В пробу помещалась половина распиленного керна.

По каждой буровой скважине формировалось дело, включающее: паспорт скважины, геолого-технический наряд, геологический разрез скважины, буровой журнал, журнал геологического описания скважины, акты заложения и закрытия скважины, акты контрольных замеров, результаты инклинометрических измерений, каталог ящиков с керном, заказы в лабораторию пробоподготовки, геофизическую колонку. На месторождении было решено производить опробование с минимальной длиной пробы 0,5 м, при выдержанном составе до 2 м, в среднем – 1 метр. В соответствии с этим керн разбивался в основном на метровые интервалы внутри литологических разностей. Определение рудоносности интервалов и опробование осуществлялось геологом.

В пробу отбиралась половина керна, отмеченная геологом, вторая половина керна оставлена в керновом ящике в качестве материала будущих технологических исследований.

В целях обеспечения необходимого качества работ все измерительное оборудование проверяется на систематической основе. Каждый день перед выполнением работ все весы проверяются с помощью специальных наборов разновесов, температура нагрева печи проверяется с помощью термопары.

Мероприятия по проверке обеспечения качества работ включают следующие действия. На первом этапе осуществлялась проверка извлечения керна с помощью замера длины керна при колонковом бурении. Аналитические дубликаты проб подготавливались на участке и формировались с использованием материала исходных проб путем деления проб в разные пробные мешки. Кодировка производилась на участке таким образом, чтобы лаборатория не могла опознать дубликаты среди прочих проб. Стандарты и бланки систематически внедряются в каждую партию аналитических проб для проверки качества анализов и подготовки проб. Бланки с стандарты направляются вместе с рядовыми пробами. При этом стандарты представляют собой порошок, а бланки – истертый кварцевый песок. Стандарты или бланки упакованы в мешки, и пронумерованы таким же образом, как рядовые пробы [19–22].

Результаты. Анализ и обсуждение

По результатам процедур опробования, подготовки проб и их анализа была построена контрольная карта Шухарта (рис. 4). Предупредительная граница была установлена в 5 % от общего содержания. Всего было проанализировано 57 проб, за пределами предупредительной линии проб не выявлено. Данный факт свидетельствует о «контролируемости» процесса и демонстрирует высокую точность сбора и анализа данных.

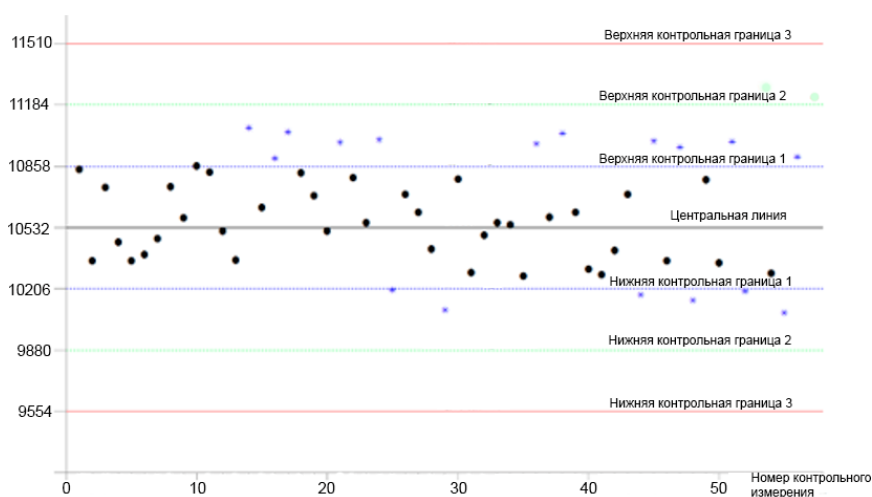


Рис. 4. Контрольная карта Шухарта оценки содержаний полезного компонента

Таким образом, в программе оценки контроля качества данных реализуется целый ряд процедур. Прежде всего необходимо реализовать проверку качества данных в процессе выполнения работ в целях мониторинга загрязнения, достоверности и точности анализов. Мониторинг загрязнений ведется посредством внедрения бланков и стандартов в установленные промежутки времени. Мониторинг достоверности ведется путем применения соответствующих стандартов. Мониторинг точности осуществляется путем дублирования проб [23–25].

На предприятии действует трехуровневая система контроля качества. Операторы обслуживания сохраняют данные в соответствующих файлах заказов для обеспечения правильной аналитической последовательности, осуществляют проверку соответствия значениям содержаний стандартов и другим контрольным процедурам. Этот же персонал инициирует проверку любых сомнительных результатов.

Вторая фаза контроля качества проводится либо контролерами качества в каждом отделе, либо руководителями отделов. И наконец, перед составлением отчетов с результатами анализов по каждой партии руководящий состав, отвечающий за отчетность по результатам, также тщательно проверяет все данные. Указанный персонал не связан напрямую с персоналом лаборатории, проводящим анализы; тем не менее, он может инициировать запрос в отношении любых операций, произведенных с той или иной пробой, и может вернуть пробу на повторный анализ в случае, если качество анализов будет неудовлетворительным.

Допуски по контролю качества для стандартов, бланков и дубликатов определяются в соответствии с применяемыми аналитическими методами, при этом система управления информацией автоматически выявляет ошибки в случае их несоответствия установленным допускам. Окончательному оформлению результатов предшествует заверка всех результатов персоналом лаборатории, оценка всех выявленных ошибок и, при наличии возможности, повторный анализ партии проб либо прямое указание на имевшие место

ошибки. Все данные, полученные с помощью контрольных проб, сохраняются для оценки качества.

Приблизительно каждая из 50 проб является лабораторным дубликатом. Анализы дубликатов используются для оценки точности лабораторных анализов при определении содержания полезного компонента. Из общего количества 5 144 анализов 105 являлись повторными анализами дубликатов (2,0%). Основная цель данного анализа заключается в оценке точности анализов и связанных с этим рисков, возникающих в отношении оценки минеральных ресурсов. Повторные анализы дубликатов на наличие полезного компонента демонстрируют хорошую сходимость с данными статистического и графического анализов, показывая близкое распределение. Все повторные анализы дубликатов проводились с точностью в $\pm 7,72\%$ (см. рис. 2), что находится в допустимых пределах, и несет малые риски в отношении точности анализов.

Повторные анализы на наличие полезного компонента демонстрируют хорошую сходимость с данными статистического и графического анализов, показывая близкое распределение. Все повторные анализы дубликатов проводились с точностью в $\pm 9,46\%$ (рис. 5), что находится в допустимых пределах и несет малые риски в отношении точности анализов.

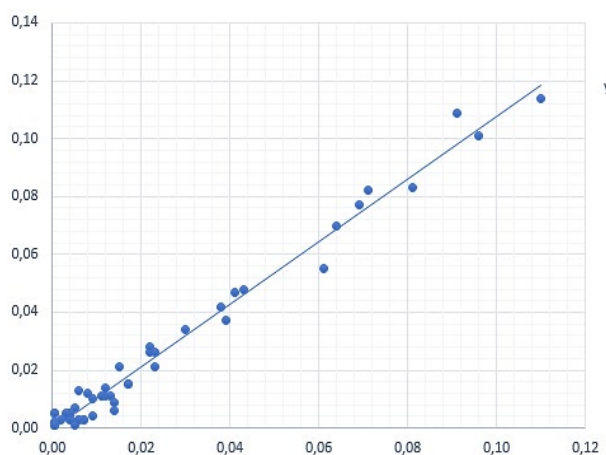


Рис. 5. Простая линейная регрессия полезного компонента по всем лабораторным аналитическим дубликатам ($y = 1,0794x - 0,0004$; $R^2 = 0,98$)

Полученные данные предопределили необходимость создания базы данных месторождения, включающую в себя файлы с координатами устьев скважин, инклинометрии, аналитическими данными (интервалами опробования), данные по геологии/литологии. База данных затем проверялась с применением макросов и процессов, предназначенных для выявления следующих ошибок: наличие повторяющихся номеров скважин; одна или более координата устьев скважин отсутствует в файле устьев; интервалы опробования не соприкасаются (существуют разрывы в результатах анализов); интервалы опробования накладываются друг на друга; значение первой отметки глубины не равно 0 м; присутствуют несколько записей инклинометрии для одной и той же глубины; значение азимута не располагается между отметками 0 и 360 градусов; значение угла бурения не располагается между отметками 0 и 90 градусов; азимут или угол отсутствуют в файле инклинометрии; общая глубина скважины меньше, чем глубина отбора последней пробы.

В рамках проведенного исследования осуществлен статистический анализ аналитических данных. Первоначальный традиционный статистический анализ проводится для оценки естественных бортовых содержаний полезного компонента для последующей интерпретации оруденения в тех случаях, когда границы оруденения определены с помощью результатов анализов [26].

После завершения интерпретации оруденения и создания каркасов все пробы кодировались с помощью моделей каркасов для маркировки проб, находящихся внутри и снаружи интерпретированных зон минерализации по бортовому содержанию полезного компонента. Затем классический статистический анализ затем проводился повторно по пробам, отобраным в пределах каркасов минерализации.

Цель второго этапа анализа заключалась в следующем: определить тип распределения содержаний в пределах зон минерализации; оценить вероятность смешивания популяций содержания полезного компонента; оценить необходимость и возможность разделения популяций содержаний при наличии более чем

одной популяции; определить значение ураганных содержаний полезного компонента для интерполяции содержаний; оценить обоснованность применения метода кригинга для интерполяции; получить статистические параметры для содержаний полезного компонента в пределах каждого интервала [27].

Был проведен статистический анализ по всем содержаниям полезного компонента для определения значения естественного бортового содержания по всем объединенным зонам минерализации. Популяция содержаний без контроля ураганных содержаний имеет четкое асимметричное логарифмическое распределение, обнаруживая несколько смешанных популяций содержаний с границами между популяциями, приблизительно равными 0,05 % и 0,15 % (рис. 6). При этом возможно интерпретировать минерализацию полезного компонента по бортовому содержанию 0,05 % (бедные интервалы) и 0,15 % (богатые интервалы).

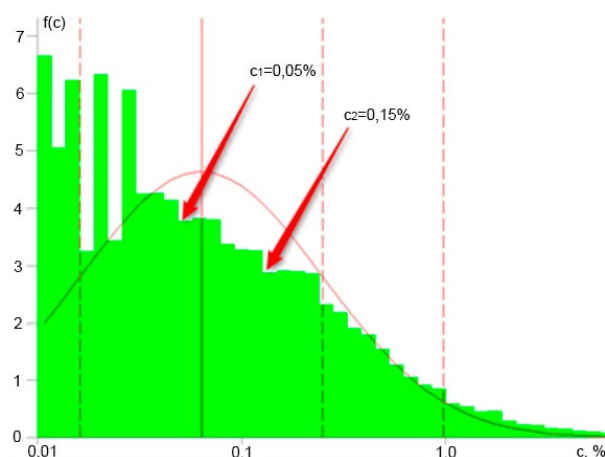


Рис. 6. Гистограмма распределения содержаний полезного компонента без контроля ураганных содержаний

После завершения интерпретации оруденения и создания каркасов все пробы кодировались с помощью каркасных моделей минерализованных тел, после чего проводился повторный традиционный статистический анализ по пробам, оказавшимся в пределах каркасных моделей.

Были построены гистограммы данных, закодированных каркасами с бортовым содер-

жанием 0,05 % и каркасами с бортовым содержанием 0,15 %.

На рис. 7 показано распределение содержаний в пределах минерализованных тел со-

ответственно. Обе гистограммы четко обнаруживают отсутствие смешивания популяций содержаний в пределах каждого интервала.

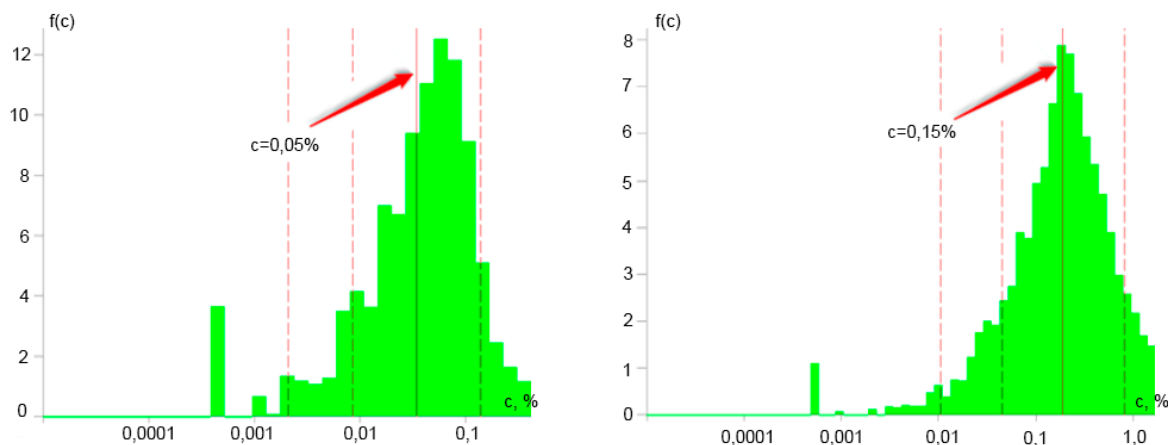


Рис. 7. Гистограмма распределения содержаний полезного компонента по бортовому содержанию 0,05 и 0,15 %

Коэффициент изменчивости для компонентных содержаний олова составил около двух, что указывает на относительную проблематичность построения хорошей вариограммы по месторождению. Логнормальные гистограммы и графики накопленной вероятности анализировались на предмет определе-

ния ураганных содержаний полезного компонента для последующего применения к исходным аналитическим данным до композитирования проб и геостатистического анализа. Исходя из результатов анализа гистограмм, был принято установить предел ураганных содержаний, равный 18 % (рис. 8).

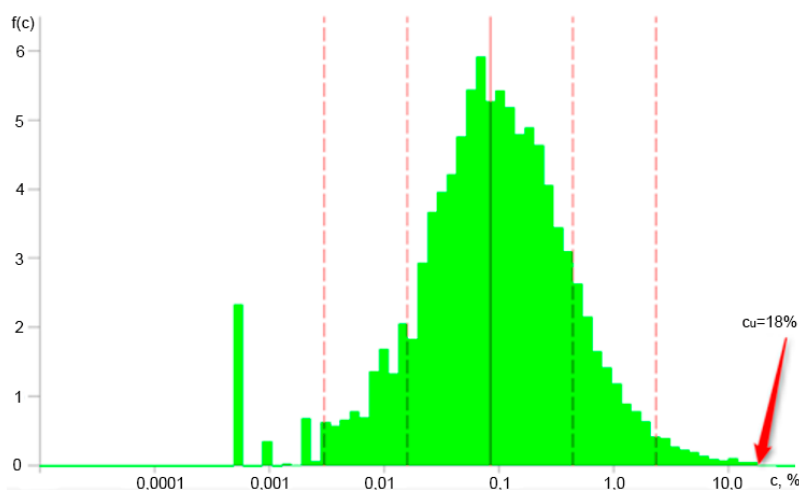


Рис. 8. Гистограмма распределения содержаний полезного компонента в пределах каркасов минерализованных тел

Таким образом, в результате проведенных исследований была сформирована программа контроля качества проведения разведочных работ на месторождении. Программа включает в

себя следующие основные разделы. Определение целостности базы данных. Включает в себя меры, предпринятые для исключения повреждения данных, например, во время переза-

писи или введения, начиная со сбора данных и до их использования в целях оценки минеральных ресурсов.

Определение и использование методов проверки данных. Проверка импортирования данных включает в себя проверку перекрывающихся интервалов, отсутствие данных съемки, отсутствие или неверные данные результатов анализов, отсутствие данных по литологии и отсутствие устьев буровых скважин.

Определение степени надежности (или неопределенности) в геологической интерпретации месторождения полезных ископаемых включает в себя картирование участков обнажения минерализации, подземные горные выработки, документацию буровых подсечений и результаты анализов. Отмечается обоснованный уровень надежности в геологической интерпретации зон минерализации, прослеживаемых с помощью многочисленных скважин и буровых разрезов и данных картирования поверхности [28–29].

Геологический контроль оценки минеральных ресурсов, в основу которого положено моделирование и интерпретация содержаний и литологии. Были установлены литологические зоны, определяющие перспективные зоны минерализации, в пределах которых проводилась оценка содержаний. Кроме того, необходимо реализовать процедуру определения факторов, негативно влияющих на выдержанность как содержаний, так и геологических характеристик.

Обоснование методики подсчета запасов и моделирования. В рамках данного раздела определяется характер и целесообразность методики, использованной оценки и основных допущений, включая обработку ураганных содержаний, зонирование, параметры интерполяции и максимальное расстояние экстраполяции между опорными точками. Оценка содержаний производилась методом ординарного кригинга. Интерпретация распространялась перпендикулярно соответствующему первому и последнему интерпретированному разрезу на расстояние, равное половине расстояния между смежными разведочными профилями. Если каркас минерализованного тела не распространялся до смежного бурового разреза, в этом случае он проецировался на половину

расстояния к следующему разрезу и обрывался. При этом выдерживалось основное направление и падение зон. Блочная модель создавалась с помощью материнских блоков размерами $20 \times 20 \times 10$ м, с субблокированием на $4 \times 4 \times 2$ м. Размер материнской ячейки устанавливался исходя из общей морфологии минерализованных тел, а также с целью исключить возможность получения чрезмерно большой блочной модели. Размер субблоков устанавливался исходя из необходимости соответствовать требуемому разрешению минерализованных тел. По возможности субблоки впоследствии оптимизировались в модели для формирования более крупных ячеек. Поиск радиусы определялись посредством оценки параметров полувариограммы, которые определили веса кригинга. Ячейки модели, которым не удалось получить содержания по результатам первой интерполяции, были использованы в следующей интерполяции с большим радиусом поиска, равным полным длинам полей влияния полувариограммы во всех направлениях. Ячейки модели, по которым не удалось получить содержания по результатам первых двух интерполяций, были оценены с помощью радиуса поиска, увеличенным на всю длину поля влияния полувариограммы. В случае оценки ячеек модели с помощью радиуса, не превышающим полные поля влияния полувариограммы, применялось ограничение минимум из трех проб минимум из двух скважин для увеличения достоверности оценки.

Обоснование верхних и нижних пределов содержаний полезного компонента проводилось с использованием данных лабораторных анализов и составляет до 5 % в силу ограничений использованных методов. По историческим результатам анализов величина предельного содержания была установлена 18 %, согласно определению, сделанному на основе традиционного статистического анализа. Проверка блочной модели заключалась в сравнении объема блочной модели с объемом каркасов. Оценки содержаний заверялись путем статистического сравнения с данными бурения, визуальными оценками основных направлений содержаний в модели с такими же направлениями по данным бурения.

Определение факторов или допущений по добыче полезного ископаемого были рассмотрены в разрезе возможных методов отработки, минимального размера карьера и внутреннего (или внешнего) разубоживания при обосновании перспектив экономической целесообразности отработки месторождения. На данном этапе освоения ресурсов предполагается, что месторождение будет обрабатываться открытым способом. Было принято допущение, что смоделированная минерализация пригодна к промышленной отработке на

все простирание, ширину и мощность. Базовый вариант проекта рудника подготовлен на основе результатов оптимизации измеренных и исчисленных ресурсов (рис. 9). На рисунке показан конечный контур карьера с поуступным распределением руды и пустой породы в тоннах для совокупных запасов месторождения. Глубина карьера примерно 205 м. Минимальная высотная отметка составляет 65 м (условный горизонт). При этом спроектирован один главный откаточный транспортный заезд с нижних горизонтов до поверхности.

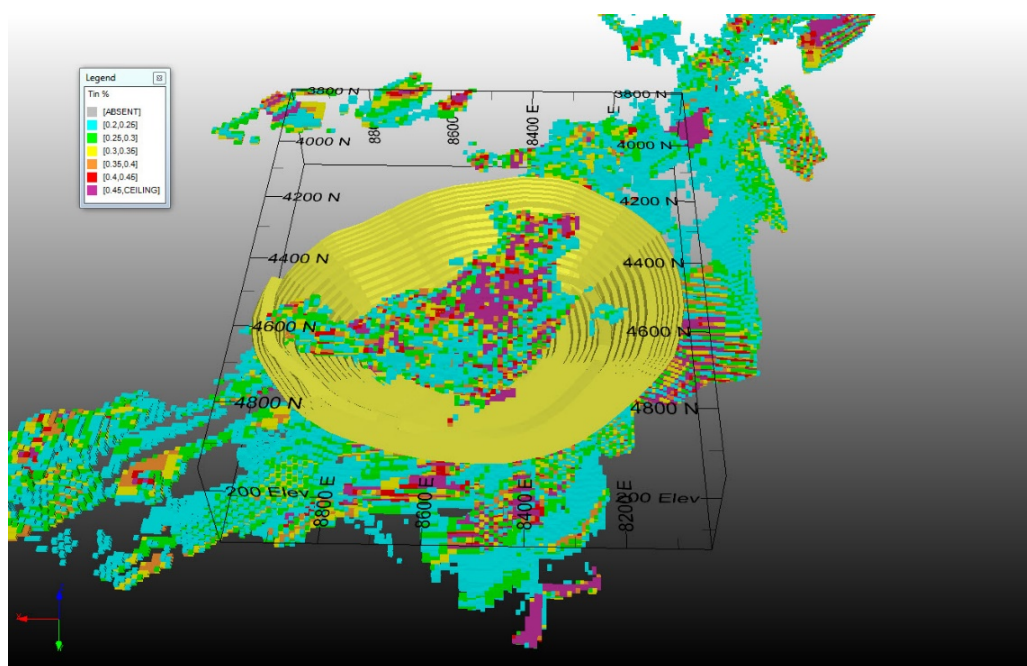


Рис. 9. Трехмерная модель проектируемого карьера (поуступное распределение руды и пустой породы в тоннах для совокупных запасов месторождения)

Выводы

В результате исследований проведена экспертиза методологии и качества геостатистических данных, вошедших в базу геолого-разведочных работ по месторождению. Произведено сравнение расположения устьев скважин относительно цифровых значений базы данных, а также заверка скважин на местности. Это позволило сделать вывод о том, что большинство скважин было пробурено согласно их проектным положениям и в целом буровая сеть получилась достаточно выдержанной и реализована в соответствии с необходимыми отраслевыми стандартами.

В работе были использованы представительные данные геологического опробования интервалов минерализации, а также определены участки месторождения для оценки изменчивости технологических свойств объекта. Геопространственные данные, использованные при реализации программы отбора проб, включали в себя местоположение устьев, данные геодезических съемок, результаты анализов, литологию и прочие литологические коды, каркасы и блочную модель месторождения. Была использована геологическая база данных и трехмерная блочная модель месторождения при определении литологических интервалов для отбора проб.

В ходе проведения работ были пробурены разноориентированные инженерно-геологические скважины с отбором керна и его последующим ориентированием для изучения всех бортов карьера и уточнения данных по структуре трещин в неветрелых метаосадочных породах.

Проведенные исследования позволили провести уточнения соответствующих бортовых содержаний в минеральных ресурсах как для приповерхностной, так и глубинной минерализации месторождения, а также осуществить ряд заверочных расчетов по процентному содержанию рудных блоков с применением трехмерного инженерно-геологического моделирования с использованием геостатистических показателей, что позволило выяснить наличие более сложного характера распределения содержаний рудного тела.

Кроме того, в работе осуществлена подготовка геологической модели, исходя из результатов интерпретации разрезов скважин и планов уступов, а также проведена оцифровка данных в виде трехмерных каркасов для выбора проб и оценки объемов. Реализованы процедуры статистического и геостатистического анализа, которые позволили выработать подходы к композитированию и обработке содержаний полезного компонента.

Разработанная блочная модель месторождения позволила осуществить классифика-

цию ресурсов, а также произвести оценку адекватности ресурсной модели методами геостатистической и визуальной проверки оцененных содержаний.

Таким образом, проведенные исследования показали, что категория предполагаемых (Inferred) минеральных ресурсов классифицирована на основании данных геопространственного моделирования, опробования проб скважин и геодезического картирования поверхности. Данных сведений достаточно для предположения, но не для заверки выдержанности геологической структуры и содержаний. Вместе с тем, участки с более плотной сеткой бурения и хорошей выдержанностью минерализованных зон классифицировались по категории Indicated («Исчисленные») и Measured («Измеренные»). При этом были учтены все релевантные факторы, определяющие категоричность запасов месторождения, такие как: относительная достоверность в оценках тоннажа/содержаний; надежность исходных данных; степень уверенности в выдержанности геологических структур и содержащегося металла; качество данных; количество и распределение данных. Классификация учитывала все имеющиеся данные по геологии и опробованию, уровень категоричности представляется соответствующим текущему этапу проекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Подрезов Д. Р. Моделирование показателей функционирования геотехнологических блоков и движения вскрытых запасов рудника подземного скважинного выщелачивания урана // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2020. – Т. 47 (2). – С. 98–107. doi:10.21822/2073-6185-2020-47-2-98-107.
2. Гончаренко С. Н., Бердалиев Б. А. Методы прогнозирования и оценки техногенного и остаточного скопления урановых руд на месторождениях, обрабатываемых способом подземного скважинного выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 5. – С. 43–48. doi: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-43-48.
3. Vostrikov A. V., Prokofeva E. N., Goncharenko S. N., Gribanov I. V. Analytical modeling for the modern mining industry // Eurasian Mining. – 2019. – № 2 (32). – P. 30–35. doi: 10.17580/em.2019.02.07.
4. Vasilyeva N. V., Fedorova E. R. Statistical methods of evaluating quality of technological process control of trends of main parameters dependence // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1118. – P. 012046. doi: 10.1088/1742-6596/1118/1/012046.
5. Карпик А. П., Лисицкий Д. В., Байков К. С., Осипов А. Г., Савиных В. Н. Геопространственный дискурс опережающего и прорывного мышления // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 53–67.
6. Бугаков П. Ю., Кацко С. Ю., Басаргин А. А., Воронкин Е. Ю. Анализ функциональных возможностей веб-приложения Kepler.gl для визуализации и анализа больших наборов пространственных данных // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 4. – С. 155–164.

7. Кацко С. Ю. Возможности информационно-аналитических ГИС в работе непрофессиональных пользователей с пространственной информацией // Вестник СГГА. – 2011. – Вып. 1 (14). – С. 76–80.
8. Ромичева Е. В. Методы обработки и визуализации больших данных // Аллея науки. – 2017. – Т. 3, № 16. – С. 976–982.
9. Rzeszotarski J. M., Kittur A. Kinetica: Naturalistic Multi-touch Data Visualization // Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '14. – P. 897–906.
10. Isenberg P., Isenberg T., Hesselmann T., Lee B., von Zadow U., & Tang A. Data Visualization on Interactive Surfaces: A Research Agenda // IEEE Computer Graphics and Applications. – 2013. – Vol. 33(2). – P. 16–24. doi: 10.1109/MCG.2013.24.
11. Towards a Spatial Knowledge Infrastructure White Paper Released [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.gsdiassociation.org/index.php/news/global-news/795-towards-a-spatial-knowledge-infrastructure-white-paper-released.html/>.
12. Written by Jon Fairall. From spatial information to Spatial Knowledge Infrastructure. By Anthony Wallace on 21 June, 2017 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.spatialsource.com.au/gis-data/spatial-information-spatial-knowledge>.
13. Blog – East View Geospatial [Electronic resource]. – Mode of access: <https://geospatial.com/blog/>.
14. Advancing role of geospatial knowledge infrastructure in world economy and society [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.geospatialworld.net/blogs/advancing-role-of-geospatial-knowledgeinfrastructure-in-world-economy-and-society>.
15. Training program: advancing role of geospatial knowledge infrastructure in world economy, society and environment [Electronic resource]. – Mode of access: <https://geospatialworldforum.org/advancing-role-of-geospatial-knowledge-in-world-economy.asp>.
16. Colman A. M. Game theory and experimental games: The study of strategic interaction. – Elsevier, 2016. – 314 p.
17. Dixit A. K., Skeath S. Games of Strategy: Fourth International Student Edition. – WW Norton & Company, 2015. – 712 p.
18. Pinde Fu, Jiulin Sun. Web GIS: principles and applications. – 1st ed. – Esri Press, 380 New York Street, Redlands, California. – P. 16.
19. Leibo J. Z., Zambaldi V., Lanctot M., Marecki J., Graepel T. Multi-agent reinforcement learning in sequential social dilemmas // Proceedings of the 16th International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – 2017. – P. 464–473.
20. He H., Boyd-Graber J., Kwok K., Daumé III H. Opponent modeling in deep reinforcement learning // Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning. – 2016. – P. 1804–1813.
21. Stone P., Kaminka G., Kraus S., Rosenschein J. Ad hoc autonomous agent teams: collaboration without pre-coordination // Proceedings of the 24th AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2010. – P. 1504–1509.
22. Genter K., Laue, T., Stone P. Three years of the RoboCup standard platform league dropin player competition: Creating and maintaining a large scale ad hoc teamwork robotics competition // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – 2017. – Vol. 31(4). – P. 790–820.
23. Neuner H., Schmitt C., Neumann I. Modelling of terrestrial laser-scanning profile measurements with // Proceedings of the 2nd Joint international Symposium on Deformation Monitoring. – Nottingham, England, 2013.
24. Savich A. I., Il'in M. M., Elkin V. P., Rechitskii V. I., Basova A. B. Geologic-engineering and geomechanical models of the rock mass in the bed of the dam at the Sayano-Shushenskaya HPP // Power Technology and Engineering. – 2013. – Vol. 47, № 2. – P. 89–101.
25. Novikov Y. A., Shchukina V. N. Preparatory stage for instrumental monitoring and structural inspection of buildings and structures // Proceedings of the International Conference «Actual Issues of Mechanical Engineering» 2017 (AIME 2017). – P. 773–778.
26. Bill Franks. Taming the big data tidal wave: finding opportunities in huge data streams with advanced analytics. – John Wiley & Sons, Inc., 2012. – 336 p. doi: 10.1002/9781119204275.
27. Dr. Arvind Sathi. Big Data Analytics: Disruptive Technologies for Changing the Game. – MC Press Online, LLC, 2012. – 91 p.
28. Prokofeva E. N., Vostrikov A. V., Fernandez E., Borisov N. Navigation satellite systems as the audit foundation for mining companies // Eurasian Mining. – 2017. – № 1. – P. 30–32. doi: 10.17580/em.2017.01.08.

29. Shepel T., Grafe B., Hartlieb P., Drebenstedt C., Malovyk A. Evaluation of cutting forces in granite treated with microwaves on the basis of multiple linear regression analysis // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2018. – Vol. 107. – P. 69–74. doi:10.1016/j.ijrmms.2018.04.043.

Получено 27.02.2021

© С. Н. Гончаренко, 2021

GEOSPATIAL SUPPORT AND CONSTRUCTION METHODS FOR THE PROGRAM OF ANALYTICAL QUALITY CONTROL OF GEOLOGICAL EXPLORATION AT THE FIELD

Sergey N. Goncharenko

National University of Science and Technology MISiS, 4, Leninskiy Prospect St., Moscow, 119049, Russia, D. Sc., Professor, Department ASU, phone: 8(499)2302811, e-mail: gs16@mail.ru

The purpose of this work is formation of a quality control program for geological exploration at the field and geological control of mineral resources evaluation. The study is based on modeling and interpretation of the content of the useful component and the lithology of the field. The contents were assessed by the ordinary kriging method. The substantiation of the upper and lower limits of the content of the useful component is carried out on the basis of laboratory research data using the methods of statistical analysis. Grade estimates were verified by statistical comparison of drilling data with visual grade grades based on modeling data. Relevant factors were taken into account that determine the degree of consistency of geological structures and the category of reserves of the field. The lithological features that determine the promising zones of mineralization have been established. Implemented data quality check procedures to monitor contamination, reliability and accuracy of analyzes. The procedure for determining the factors that negatively affect the consistency of grades and the parameters of geological characteristics has been implemented. The development and verification of the block model of the field was carried out and the comparison of the volume of the useful component of the block model with the volumes of the formed frames was carried out. As a result of the research carried out, the classification of reserves was carried out, taking into account the initial set of available data on the geological structures of the field, analytical sampling data and the content of the useful component.

Keywords: data quality control, sample preparation, block model of the field, consistency of geological structures, metal content limits, mineralization zones

REFERENCES

1. Podrezov, D. R. (2020). Modeling the performance indicators of geotechnological blocks and the movement of the discovered reserves of an underground borehole leaching of uranium. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences]*, 47(2), 98–107. doi: 10.21822/2073-6185-2020-47-2-98-107 [in Russian].
2. Goncharenko, S. N., & Berdaliev, B. A. (2018). Methods to predict and estimate residual and technological concentrations of uranium ore in in-situ leaching mining. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten [Mining Informational and Analytical Bulletin]*, 5, 43–48 doi: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-43-48 [in Russian].
3. Vostrikov, A. V., Prokofeva, E. N., Goncharenko, S. N., & Griбанov, I. V. (2019). Analytical modeling for the modern mining industry. *Eurasian Mining*, 2(32), 30–35. doi: 10.17580/em.2019.02.07.
4. Vasilyeva, N. V., & Fedorova, E. R. (2018). Statistical methods of evaluating quality of technological process control of trends of main parameters dependence. *Journal of Physics: Conference Series*, 1118, P. 012046. doi: 10.1088/1742-6596/1118/1/012046.
5. Karpik, A. P., Lisitsky, D. V., Baykov, K. S., Osipov, A. G., & Savinykh, V. N. (2017). Geospatial Discourse of Advanced and Breakthrough Thinking. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(4), 53–68 [in Russian].

6. Bugakov, P. Yu., Katsko, S. Yu., Basargin, A. A., & Voronkin, E. Yu. (2018). Analysis of the Functionality of the Web Application Kepler. GI Forvisualizing and Analyzing of Large Spatial Datasets. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(4), 155–164 [in Russian].
7. Katsko, S. Yu. (2011). The potential of information and analytical GIS for the work of non-professional users with spatial information. *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 1(14), 76–80 [in Russian].
8. Romicheva, E. V. (2017). Methods of processing and visualization of big data. *Alleya nauki [Science Alley]*, 3(16), 976–982 [in Russian].
9. Rzeszotarski, J. M., & Kittur, A. (2014). Kinetica: Naturalistic Multi-touch Data Visualization. Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '14 (pp. 897–906).
10. Isenberg, P., Isenberg, T., Hesselmann, T., Lee, B., von Zadow, U., & Tang, A. (2013). Data Visualization on Interactive Surfaces: A Research Agenda. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 33(2), 16–24. doi: 10.1109/MCG.2013.24.
11. Towards a Spatial Knowledge Infrastructure White Paper Released. (n. d.). Retrieved from <http://www.gsdiassociation.org/index.php/news/global-news/795-towards-a-spatial-knowledge-infrastructure-white-paper-released.html/>.
12. Written by Jon Fairall. From spatial information to Spatial Knowledge Infrastructure. By Anthony Wallace on 21 June, 2017. Retrieved from <https://www.spatialsource.com.au/gis-data/spatial-information-spatial-knowledge>.
13. Blog – East View Geospatial. (n. d.). Retrieved from <https://geospatial.com/blog/>.
14. Advancing role of geospatial knowledge infrastructure in world economy and society. (n. d.). Retrieved from <https://www.geospatialworld.net/blogs/advancing-role-of-geospatial-knowledgeinfrastructure-in-world-economy-and-society>.
15. Training program: advancing role of geospatial knowledge infrastructure in world economy, society and environment. (n. d.). Retrieved from <https://geospatialworldforum.org/advancing-role-of-geospatial-knowledge-in-world-economy.asp>.
16. Colman, A. M. (2016). *Game theory and experimental games: The study of strategic interaction*. Elsevier, 314 p.
17. Dixit, A. K., & Skeath, S. (2015). *Games of Strategy* (4th International Student ed.). WW Norton & Company, 712 p.
18. Pinde, Fu, & Jiulin, Sun. (2010). *Web GIS: principles and applications* (1st ed). Esri Press, 380 New York Street, Redlands, California, P. 16.
19. Leibo, J. Z., Zambaldi, V., Lanctot, M., Marecki, J., & Graepel, T. (2017). Multi-agent reinforcement learning in sequential social dilemmas. In *Proceedings of the 16th International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* (pp. 464–473).
20. He, H., Boyd-Graber, J., Kwok, K., & Daumé III, H. (2016). Opponent modeling in deep reinforcement learning. In *Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning* (pp. 1804–1813).
21. Stone, P., Kaminka, G., Kraus, S., & Rosenschein, J. (2010). Ad hoc autonomous agent teams: collaboration without pre-coordination. In *Proceedings of the 24th AAAI Conference on Artificial Intelligence* (pp. 1504–1509).
22. Genter, K., Laue, T., & Stone, P. (2017). Three years of the RoboCup standard platform league dropin player competition: Creating and maintaining a large scale ad hoc teamwork robotics competition. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 31(4), 790–820.
23. Neuner, H., Schmitt, C., & Neumann, I. (2013). Modelling of terrestrial laser-scanning profile measurements with. In *Proceedings of the 2nd Joint international Symposium on Deformation Monitoring*. Nottingham, England.
24. Savich, A. I., Ilin, M. M., Elkin, V. P., Rechitskii, V. I., & Basova, A. B. (2013). Geologic-engineering and geomechanical models of the rock mass in the bed of the dam at the Sayano-Shushenskaya HPP. *Power Technology and Engineering*, 47(2), 89–101.
25. Novikov, Y. A., & Shchukina, V. N. (2017). Preparatory stage for instrumental monitoring and structural inspection of buildings and structures. In *Proceedings of the International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering" 2017, AIME 2017* (pp. 773–778).
26. Bill Franks. (2012). *Taming the big data tidal wave: finding opportunities in huge data streams with advanced analytics*. John Wiley & Sons, Inc., 336 p. doi: 10.1002/9781119204275.
27. Dr. Arvind Sathi. (2012). *Big Data Analytics: Disruptive Technologies for Changing the Game*. MC Press Online, LLC, 91 p.

28. Prokofeva, E. N., Vostrikov, A. V., Fernandez, E., & Borisov, N. (2017). Navigation satellite systems as the audit foundation for mining companies. *Eurasian Mining*, 1, 30–32. doi: 10.17580/em.2017.01.08.

29. Shepel, T., Grafe, B., Hartlieb, P., Drebenstedt, C., & Malovyk, A. (2018). Evaluation of cutting forces in granite treated with microwaves on the basis of multiple linear regression analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 107, 69–74. doi: 10.1016/j.ijrmms.2018.04.043.

Received 27.02.2021

© S. N. Goncharenko, 2021