



Список литературы=References

1. Донской С. Е. О проекте «Стратегия развития геологической отрасли до 2030 года» // Разведка и охрана недр. 2010. № 1. = S. E. Donskoy. About the Project: Strategy for the development of the exploration sector up to 2030 // Razvedka i Okhrana Nedr, 2010, № 1 (in Russian).
2. Орлов В. П. К вопросу о долгосрочной стратегии развития геологической службы страны // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2009. № 2. = V. P. Orlov. On the issue of a long-term strategy for the development of the Geological Survey in the country. Mineralnye Resursy Rossii. Ekonomika i Upravleniye, 2009, № 2 (in Russian).
3. Виталий Несис критично охарактеризовал состояние российской золотодобычи (доклад на 4-м горно-геологическом форуме Minex, 1-3 октября, Москва) // Драгоценные металлы, драгоценные камни. 2008. № 10 (178). = Vitaliy Nesis has criticized the state-of-the art of the Russian gold mining sector (presentation at the 4th Minex Mining-Geological Forum, 1-3 October, Moscow) // Dragotsennnye Metally, Dragotsennnye Kamni. 2008, № 10 (178) (in Russian).
4. Кавун К. П. Минерально-сырьевые активы: международные стандарты классификации, отчетности и раскрытия информации. М., 2006. = K. P. Kavun. Mineral assets: International standards of classifications, reporting and information disclosure. M., 2006 (in Russian).
5. Марина Кларисс. В разведку с нерезидентом. Почему отечественные месторождения оценивают западные инвесторы // Российская бизнес-газета № 625 от 16.10.2007 г. = Marina Klariss. Exploration with the participation of non-residents. Why the national mineral wealth is valued by foreign investors // Rossiyskaya Biznes-Gazeta No 625, 16 October 2007 (in Russian).
6. Подтуркин Ю. А., Коткин В. А., Малухин Г. Н. О проблеме российских горных компаний при публичном размещении акций и их котировке на зарубежных биржах // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2009. № 2. = Yu. A. Podturkin, V. A. Kotkin, G. N. Malukhin. On the problem of Russian mining companies occurring in the process of the initial public offering and listing at foreign stock exchanges // Mineralnye Resursy Rossii. Ekonomika i Upravleniye. 2009, № 2 (in Russian).

УДК 553.04:553.072

© Коллектив авторов, 2010

Применение методов геостатистики и горно-геологических информационных технологий при госэкспертизе запасов рудных месторождений: проблемы и решения

В. Г. Будрик,
начальник отдела металлов ФГУ ГКЗ,
канд. геол.-минерал. наук

О. И. Гуськов,
профессор РГГРУ, канд. геол.-минерал. наук

А. И. Ежов,
директор НП НАЭН, канд. геол.-минерал. наук
ezhov@gkz-rf.ru

П. П. Кушнарев,
главный специалист отдела металлов ФГУ ГКЗ

В. Ю. Маркевич,
зам. руководителя группы математического
моделирования УК «Полюс геологоразведка»,
канд. геол.-минерал. наук

Использование методов геостатистики и горно-геологических информационных технологий (ГГИТ) при подсчете запасов твердых полезных ископаемых (ТПИ) – обязательное требование международных стандартов оценки запасов месторождений ТПИ. В российской практике аналогичные методы и технологии подсчета запасов ТПИ применяются только при наличии у российских недропользователей иностранных инвесторов. Основные проблемы использования методов геостатистики и ГГИТ при подсчете запасов рудных месторождений, подлежащих государственной экспертизе, связаны с необходимостью согласования ведущих кондиционных показателей (бортового содержания, минимальной мощности рудных тел и максимальной мощности прослоев пустых пород и некондиционных руд), принятых в практике российского недропользования, с характеристиками (содержаниями, размерами и ориентировкой) блоков геостатистических моделей рудных месторождений. Решение этих проблем возможно в процессе гармонизации российских и международных стандартов оценки минерально-сырьевых ресурсов.

На основе опыта работы ГКЗ с материалами геостатистического моделирования рудных месторождений сформировались требования к ГГИТ в части обязательного наличия в них: электронных баз первичных геологических, горнотехнических и экономических данных с характеристиками всех файлов; описания полной технологической цепочки обработки информации от исходных файлов до конечных результатов; программных средств, позволяющих осуществлять проверку, корректировку, объединение файлов и формирование выборок; программных средств

(блоков) геологического, статистического и геостатистического моделирования; программных средств составления графических геологических и подсчетных документов.

Ряд требований предъявляется и к представляемым на госэкспертизу материалам подсчетов запасов, выполненным с использованием ГГИТ, а именно: материалы должны содержать описание всех применяемых алгоритмов и параметров моделей; при собственно геостатистическом моделировании необходимо обосновывать вид применяемых функций для аппроксимации вариограмм, параметры поис-

ЭСПЕРТИЗА

За период с конца 2006 г. по февраль 2009 г. отдел металлов ФГУ ГКЗ провел государственную экспертизу запасов (в основном геологическое обоснование ТЭО кондиций), подсчитанных с применением методов геостатистики и ГГИТ (Datamine, Micromine, Gemcom, GEMS, Surpac Vision, NPV Scheduler), по следующим месторождениям золота, серебра, меди, никеля, платины, свинца, цинка, титана, железа, тантала, ниобия: Наталкинское, Дукал, Купол, Многовершинное, Покровское, Пионер, Тасеевское, Голец Высочайший, Ключус, Албазинское, Нежданкинское, Чертово Корыто, Лунное, Титимухта, Ключевское, Павлик, Ново-Широкинское, Култуминское, Маминское, Воргавож, Федорова Тундра, Киевей, Верхнекингашское, Соукер, Масловское, Холоднинское, Каменушинское, Михеевское, Юго-Восточная Гремяха, Ак-Сугское, Кекура, Бамское, Вернинское, Галкинское и др. Кроме подсчета запасов, перечисленные технологии были использованы в представленных недропользователями материалах для оптимизации параметров карьеров при проектировании открытых горных работ.

ковых эллипсоидов и элементарных блоков блочных моделей; оптимальность принимаемых параметров моделей рекомендуется оценивать перекрестной проверкой; оценка каждого месторождения должна быть построена как сумма индивидуальных оценок, однородных по геологическому строению и степени разведанности участков (доменов).

Практикой применения геостатистики для подсчета запасов рудных месторождений выявлен ряд проблем, обусловленных несоответствием геостатистических методов требованиям российских нормативно-методических документов. Общие требования к материалам подсчета запасов с применением геостатистики определяются системой действующих в РФ методических рекомендаций, включая рекомендации по использованию ГГИТ, что в настоящее время, в свете интенсивного развития горного бизнеса, является особенно актуальным, поскольку современные международные стандарты оценки минерального сырья обычно предусматривают необходимость использования этих технологий и геостатистики.

В российской практике для геометризации месторождений используются лимиты на содержание полезного компонента в краевой пробе (бортовое содержание), минимальную мощность рудных тел и максимальный прослой пустых пород или некондиционных руд, включаемых в контуры подсчета запасов. В зарубежной практике запасы месторождения характеризуются пространственной совокупностью элементарных блоков блочной модели, создаваемых в результате геолого-математического (геостатистического в широком смысле) моделирования и удовлетворяющих условию окупаемости затрат на их извлечение из недр и переработку содержащейся в них руды. Однако действующие в РФ стандарты оценки рудных месторождений отличаются от зарубежных прежде всего в части категоризации запасов, а также состава и содержания кондиционных параметров.

Основное расхождение кондиционных параметров обусловлено различием геометрической базы (геометрического основания) опробования (размеров, формы и ориентировки) с одной стороны – проб в выработках геологической разведки, а с другой – элементарных блоков (блоков кригинга), формируемых в результате геостатистического анализа разведочных данных по месторождениям. Применение к различающимся геометрическим объемам – пробам и блокам кригинга – единых лимитов на содержание полезных компонентов, как правило, приводит к систематическим расхожде-

ням в оценке запасов месторождений и средних содержаний компонентов в них. Этот эффект (support-effect) иллюстрируется результатами сопоставления средних содержаний и геологических запасов руды и золота одного из золоторудных месторождений (рис. 1). Было установлено, что по мере ужесточения бортового содержания запасы руды геостатистическим моделированием завышаются по отношению к традиционному подсчету с 6,5 до 70,8 %, запасы золота – с 1,9 до 12,6 %, а содержание металла в руде снижается в пределах от 4,2 до 34,3 % (табл. 1).

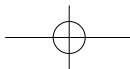
При соотнесении контуров геологических запасов, выделенных по вариантам бортового содержания золота в керновых пробах одного из разведочных разрезов этого же месторождения, с положением элементарных блоков блочной модели при соответствующих минимальных содержаниях в этих блоках (рис. 2) нетрудно убедиться, что некоторая часть блоков кригинга выходит за границы рудных тел, установленные по данным опробования разведочных выработок (эффект cut-off).

Рассматриваемый эффект проявляется также при анализе статистических распределений содержаний полезного компонента: с одной стороны – в пробах геологической разведки данного месторождения (рис. 3, а), с другой – в блоках кригинга (рис. 3, б). Объемы проб и блоков несоизмеримы по величине, и соответствующие статистические распределения содержаний золота существенно различаются. Это выражается, в частности, в различии дисперсий: дисперсия содержаний в пробах всегда больше дисперсии в блоках. Если на оси абсцисс выбрать некоторое одинаковое

Запасы рудных месторождений, подсчитанные с использованием ЭВМ, начали поступать на государственную экспертизу в Государственную комиссию по запасам полезных ископаемых (ГКЗ) в начале 1970-х годов. Это были месторождения Рывеем (золото), Богуты (вольфрам), Джезказган (медь) и др. Подсчеты их запасов выполнялись различными организациями Мингео СССР традиционно – способами геологических блоков и разрезов с использованием оригинальных программ для ЭВМ различных типов. С помощью таких программ были автоматизированы практически все трудоемкие расчетные операции по предварительной обработке исходных данных и собственно подсчету запасов. Результаты представлялись в виде таблиц произвольной формы и планов изолиний подсчетных параметров. Увязка рудных интервалов в разведочных сечениях и выделение подсчетных блоков выполнялись без использования ЭВМ (в «ручном» режиме).

Первый опыт экспертизы в ГКЗ СССР результатов геостатистического подсчета запасов, выполненного швейцарскими геологами по материалам железорудного месторождения Южный Тарут (Ливия), датируется 1982 г. Методика подсчета в представленных материалах не была отражена, поэтому для проверки результатов экспертизой был выполнен контрольный подсчет методом геологических блоков. Расхождение оценок запасов составило 4 %, что позволило сделать вывод о возможности применения методов геостатистики при подсчете запасов месторождений простого геологического строения, изученных равномерной сетью разведочных пересечений.

Внедрение геостатистических методов подсчета запасов в отечественную практику недропользования происходило в 1990-х годах, по мере распространения в России зарубежных ГГИТ, которые позволяли: создавать единые системы подготовки и обработки геологоразведочных данных на всех стадиях изучения месторождений и использовать их для составления ТЭО кондиций, подсчета запасов, проектирования, перспективного и оперативного планирования работы горнодобывающих предприятий; сократить затраты средств и времени на составление ТЭО кондиций и подсчетов запасов; уменьшить погрешности оценок запасов и качества руд; выполнять повариантные расчеты при геологическом, горнотехническом и экономическом обосновании кондиций; представлять материалы в форматах, удобных для проведения международного аудита.



для обоих графиков граничное значение, то нетрудно убедиться, что запасы блочной модели, оцениваемые накопленными частотами гистограммы содержаний золота в блоках справа от граничного значения, больше запасов, определенных по пробам.

Проанализировав материалы, представленные по данному месторождению, ГКЗ приняла решение об утверждении его запасов по результатам традиционного подсчета с учетом бортового содержания золота, обоснованного технико-экономическими расчетами.

Подсчет запасов рудных месторождений традиционными методами опирается на результаты геометризации рудных тел по данным геологической документации и опробования разведочных выработок. Этот подход (геолого-геометрическое моделирование) принят за основу оценки рудных месторождений в отечественной практике, а результаты его применения сопровождаются доказательствами надежности.

Расхождение результатов подсчета запасов на основе геостатистического (блочного) моделирования и подсчета традиционным способом неизбежно. Оно вытекает из сущности геостатистического моделирования, которое опирается на исследование пространственной изменчивости оруднения с помощью вариограммы – функции, выражающей зависимость расхождений значений геологической переменной в точках ее замеров от расстояния между ними h (рис. 4). Вариограмма является эквивалентом автокорреляционной функции и определяет пространственные пределы взаимной зависимости (интервалы взаимного влияния) значений геологической переменной. Вариограммы, рассчитанные в направлениях трехмерного пространства в объеме рудного тела и аппроксимированные математическими моделями, позволяют построить эллипсоид автокорреляции, или так называемый поисковый эллипсоид (рис. 5). Совокупность замеров геологической переменной внутри эллипсоида учитывается для оценок этой переменной в неопробованных заданных точках внутри объема рудного тела. Оценка переменной в заданных точках осуществляется оптимальной в математическом смысле (т. е. минимизирующей дисперсию) процедурой – кригингом, в рамках которой решением системы уравнений определяются весовые коэффициенты, учитывающие вклад в результаты расчетов каждого фактического значения геологической переменной в точках опробования (рис. 6). Решение системы уравнений кригинга имеет вид:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \sigma_{14} & 1 \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} & \sigma_{24} & 1 \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} & \sigma_{34} & 1 \\ \sigma_{41} & \sigma_{42} & \sigma_{43} & \sigma_{44} & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_{01} \\ \sigma_{02} \\ \sigma_{03} \\ \sigma_{04} \\ 1 \end{bmatrix},$$

где a – искомые весовые коэффициенты величин переменной в точках с соответствующими номерами; σ – величины ковариации, определяемые вариограммой и зависящие от расстояния между соответствующими точками; μ – множитель Лагранжа.

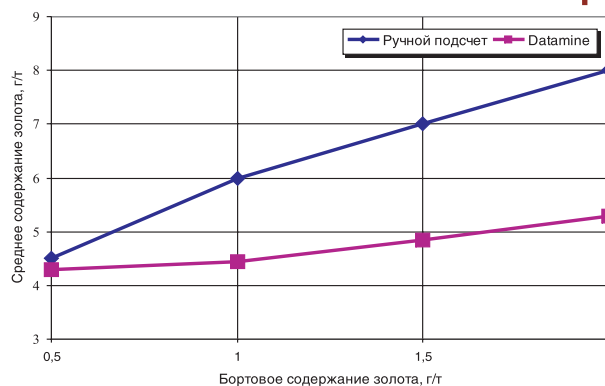


Рис. 1. Изменение среднего содержания золота в зависимости от его бортового содержания для блочных моделей месторождения в сопоставлении со средними содержаниями в контурах рудных тел, выделенных по бортовому содержанию

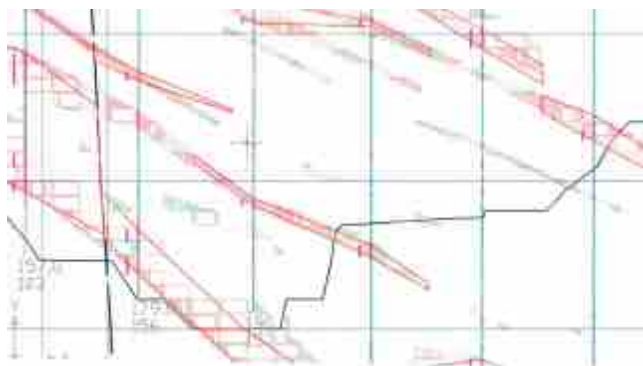
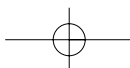


Рис. 2. Сравнение результатов оконтуривания рудных тел традиционным способом (по бортовому содержанию золота) и на основе блочного моделирования (контур – красная сплошная линия)

Если интервалы влияния пространственной переменной больше расстояния между разведочными пересечениями рудных тел (больше густоты разведочной сети), что является одним из условий геостатистического моделирования, то некоторые блоки кригинга выходят за установленные в разведочных выработках границы рудных тел, что увеличивает запасы руды месторождения в сравнении с результатом подсчета традиционным методом. Кроме того, кригинг обладает сглаживающим влиянием на исходные данные, участвующие в подсчете запасов, так как содержание полезного компонента в каждой заданной точке объема рудного тела оценивается кригингом не только с учетом величины этого содержания в ближайшей разведочной выработке, но также с учетом содержаний в других выработках, окружающих оце-

Таблица 1. Отклонения запасов, подсчитанных геостатистическим методом, от подсчитанных традиционным методом

Бортовое содержание золота, г/т	Отклонения, %		
	запасов руды	среднего содержания золота	запасов золота
0,5	+6,5	-4,2	+1,9
1,0	+44,6	-25,5	+7,8
1,5	+65,6	-32,1	+12,6
2,0	+70,8	-34,3	+12,2



ЭКСПЕРТИЗА

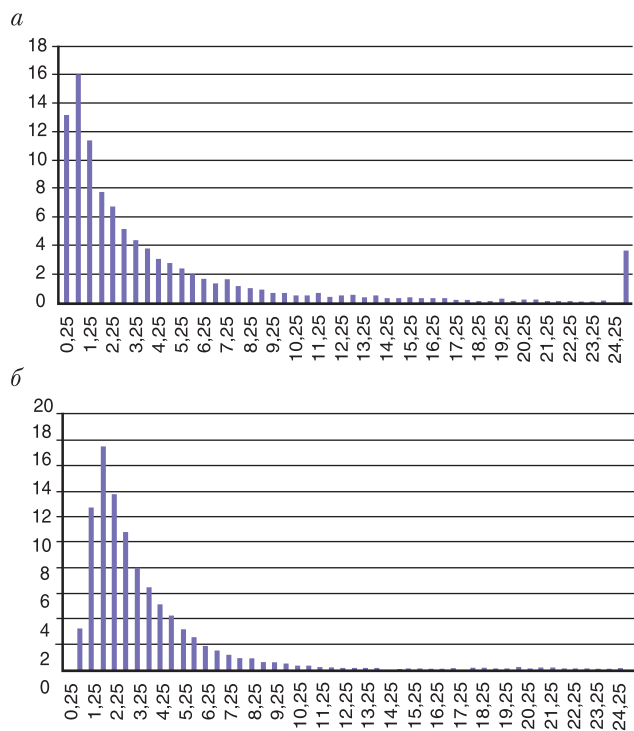


Рис. 3. Гистограммы содержаний золота в пробах геологической разведки (а) и в блоках кригинга (б)

ниваемую точку. Количество участвующих в расчетах разведочных выработок, проб в них и весовые коэффициенты, с которыми ближайшие и окружающие выработки и пробы участвуют в расчетах, зависят от пространственной изменчивости оруденения (выражаемой моделью вариограммы) и расстояний фактических проб до оцениваемой точки.

В результате кригинга пробы с высокими содержаниями полезного компонента под влиянием окружающих проб с относительно низкими содержаниями нивелируются и, наоборот, в локальном объеме рудного тела, характеризующемся низкими содержаниями полезного компонента, под влиянием окружающих проб с относительно высокими содержаниями увеличивается содержание полезного компонента. Это увеличение может достигать такой степени, что часть блоков кригинга за границами рудного тела будет ха-

рактеризоваться содержаниями выше бортового. В итоге, в рамках геостатистического моделирования, за фактически границами рудного тела могут появляться дополнительные блоки кригинга с содержаниями выше бортового, что также искусственно увеличивает запасы руды (см. рис. 2). Снижение содержания полезного компонента в рудном теле в целом за счет кригинга происходит в результате вовлечения в расчеты проб с низкими содержаниями за пределами фактических границ рудного тела при формировании соответствующих блоков блочной модели.

Как показывает опыт проведения госэкспертизы запасов рудных месторождений, подсчитанных на основе применения геостатистики и использования ГГИТ, основная проблема их оценки на основе блочного моделирования заключается в том, чтобы в каждом конкретном случае выбранному по результатам повариантного анализа минимальному содержанию в блоке кригинга (cut-off) найти соответствующее бортовое содержание в пробе геологической разведки, руководствуясь требованием взаимного соответствия запасов, подсчитанных обоими способами.

Для оконтуривания оруденения при отсутствии четких геологических границ при традиционном подходе используются кондиционные показатели – бортовое содержание в краевой пробе, минимальная мощность рудного тела, максимальная мощность прослоев пустых пород и некондиционных руд, включаемых в контур подсчета запасов. При блочном моделировании лимитирующими показателями являются предельное содержание в элементарном блоке (cut-off) и его размеры.

Геостатистическое моделирование требует определения пространства, в котором проводятся расчетные операции. Границы этого пространства задаются каркасами или оболочками. Принципы построения оболочек строго не регламентируются; они могут проводиться по геологическим признакам, в том числе по так называемому природному борту, который устанавливается на основе статистических исследований по данным опробования. Построение «свободных» оболочек особенно характерно для моделирования на ранних стадиях геологоразведочных работ, когда геологические особенности объекта недостаточно изучены. Такое же положение возникает при наличии прерывистого оруденения, подсчет запасов которого проводится с применением коэффициента рудоносности для традиционного метода.

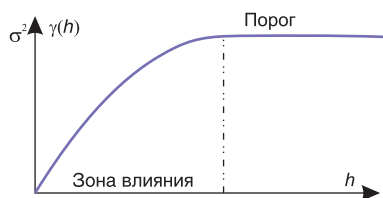


Рис. 4. Типичная вариограмма, которая достигает предела (порога, соответствующего статистической дисперсии) на расстоянии, соответствующем зоне влияния переменной

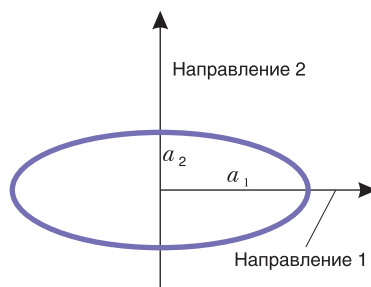


Рис. 5. Сечение поискового эллипсоида (a_1, a_2 – радиусы эллипсоида)

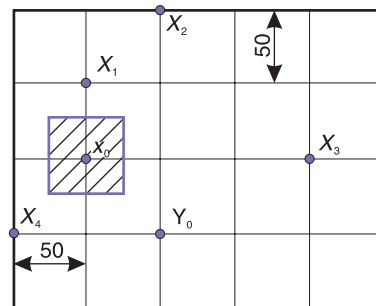


Рис. 6. Схема кригинга: оценивается величина переменной в точке Y_0 по данным точек X_1, X_2, X_3, X_4

Содержания по пробам и по элементарным блокам в пределах одного каркаса различаются параметрами статистических распределений, в том числе дисперсиями и показателями асимметрии; средние содержания по ним должны быть практически равны. Разделение этих статистических совокупностей на рудную и безрудную части по величине бортового содержания приводит к появлению систематического смещения (различия) в оценке средних содержаний в руде для традиционного подсчета и блочной модели (см. рис. 3). Смещение оценок содержаний связано с различием геометрической базы (support-effect) моделирования (пробы и элементарного блока), а также с влиянием «сглаживания» в геостатистических моделях. Величина смещения при одних и тех же исходных условиях будет зависеть от вида геостатистической модели, ее параметров, уровня бортового лимита и от других факторов. Таким образом, использование одинакового лимита для элементарных блоков и проб в условиях «свободных» оболочек всегда приводит к систематической ошибке в оценке содержаний.

Смещение устраняется или учитывается различными способами: использованием значения cut-off, отличающегося от величины бортового содержания (т. е. другого предельного содержания); изменением контуров оболочек (каркасов); использованием процедур, преобразующих распределение содержаний в элементарных блоках, в частности, процедур нелинейного кригинга. В первом случае на основе сравнения результатов традиционного подсчета и блочного моделирования устанавливается поправочный коэффициент. Представляется, что этот прием в ограниченных условиях может применяться для повариантного подсчета запасов при разработке ТЭО. В то же время его нельзя использовать для подсчета запасов и определения кондиционных показателей.

Наиболее полное совпадение результатов подсчета запасов традиционным методом и по блочной модели достигается при построении оболочек, совпадающих с контуром рудных тел, построенных по бортовому содержанию (для проб). В этом случае вопрос о применении особого лимита для элементарных блоков не возникает. Вместе с тем этот подход является достаточно трудоемким, что снижает привлекательность использования блочных моделей.

Процедуры преобразования распределений по элементарным блокам достаточно эффективны, однако возможности их применения имеют ряд ограничений. Одно из них – требование относительно высокого (не менее 0,7) коэффициента рудоносности в выделенном каркасе. Необходимо, кроме того, чтобы распределения содержаний соответствовали нормальному или логарифмически нормальному закону. Использование данных процедур осложняется также тем, что они реализованы не во всех ГГИТ.

Минимальная мощность рудного тела и максимальная мощность прослоев пустых пород и некондиционных руд в традиционном подсчете зачастую выбираются разными по величине, причем возможности горной технологии при выборе этих показателей могут учитываться не в полной мере. В рамках блочного моделирования величины этих показателей кондиций могут регулироваться размерами

элементарных блоков, что подразумевает равенство их значений. Представляется, что размеры элементарных блоков должны выбираться с учетом размеров объемов селекции для выбранной системы обработки.

Как ГКЗ, так и недропользователи в настоящее время не располагают доступным инструментом для того, чтобы установить и применить критерии соответствия подсчета запасов традиционным и геостатистическим способами. В результате принятие решений о выборе оптимального бортового содержания полезного компонента на основе повариантного геостатистического подсчета запасов достигается экспертным путем. Экспертная комиссия обычно предъявляет авторам представляемых на экспертизу материалов требование частичной заверки повариантного геостатистического подсчета запасов традиционным. Что касается окончательного подсчета запасов на основании утвержденных кондиций, то в настоящее время требуется заверка геостатистического подсчета традиционным в полном объеме.

В процессе проведения экспертизы материалов геостатистических подсчетов запасов экспертные комиссии сталкиваются с рядом других недостатков использования информативных технологий, которые также преодолеваются экспертным путем. К числу этих недостатков относятся следующие:

- ♦ отсутствие группировки блоков кригинга по доменам – однородным подсчетным блокам, принятым в практике российского учета запасов;
- ♦ отсутствие в представляемых материалах какой-либо категоризации запасов (как в отечественной системе, так и в системе стандартов CRIRSCO);
- ♦ выбор размеров, конфигурации и, часто, ориентировки блоков кригинга без учета горнотехнических кондиций (минимальной мощности рудных тел и максимальной мощности прослоев пустых пород и некондиционных руд), густоты разведочной сети и анизотропии изменчивости оруденения;
- ♦ моделирование пространственной изменчивости без учета особенностей геологического строения месторождений, когда эллипсоид автокорреляции не соответствует природной анизотропии оруденения (рис. 7, 8).

Практика экспертизы материалов геостатистических подсчетов запасов рудных месторождений не изобилует положительными примерами и, тем не менее, они имеются. Остановимся на двух золоторудных месторождениях – Ключевском и Ключус.

Таблица 2. Относительные отклонения данных геостатистического подсчета запасов от данных традиционного подсчета

Бортовое содержание, г/т	Отклонения, %		
	запасов руды	запасов золота	содержания золота
0,5	0,7	-1,7	-2,5
0,7	-0,9	-4,1	-3,4
1,0	-0,4	-0,3	0

ЭКСПЕРТИЗА

Подсчет запасов Ключевского месторождения является примером подсчета запасов на основе использования ГГИТ Micromine, когда бортовое содержание в кондициях (0,7 г/т) было принято по предложению авторов: ООО «Макромайн Раша» и ЗАО «Рудник «Западная-Ключи» (недропользователь). Подсчет запасов выполнен для трех вариантов бортового содержания: 0,5; 0,7 и 1 г/т. В построенных границах каркасных моделей были получены три блочные модели месторождения. Размеры блоков кригинга (5×10×10 м) соответствуют горно-технологическим параметрам кондиций – минимальной мощности рудных тел и максимальной мощности прослоев пустых пород и некондиционных руд, включаемых в контур подсчета. И тот и другой параметр равны 5 м, что отражает особенности пространственного распределения оруденения в направлении максимальной изменчивости (по мощности рудных тел) и учитывает особенности технологии горных работ в карьере – величину уступа (подступа) карьера.

Для обоснования применения геостатистического способа подсчета для запасов между горизонтами 730–630 м было проведено сравнение с традиционным способом – горизонтальных параллельных сечений (горизонтальных разрезов). В сопоставлении участвовало 55 % запасов месторождения, что экспертизой признано достаточным. Результаты сопоставления по сумме категорий C_1+C_2 представлены в табл. 2. Максимальное отклонение результатов геостатистического подсчета от традиционного составляет –4,1 % для запасов золота при оптимальном варианте бортового содержания.

Геостатистическое моделирование месторождения Кючус проведено в каркасах однородных доменов. Сравнение его результатов с традиционным подсчетом запасов свидетельствует о высокой степени сходимости (рис. 9). Авторами выполнена заверка данных блочного моделирования результатами традиционного подсчета (методом разрезов) по 14 блокам (7,2 млн т руды), что составляет 40,7 % запасов открытой разработки и 28,3 % общих запасов месторождения. Расхождения запасов руды, золота и средних содержаний по отдельным блокам имеют разные знаки и не превышают 20 %, а в крупных блоках редко превышает 6 %. В среднем по участку, выделенному для заверки, величина запасов руды, оцененная различными способами, практически не различается (0,27 %). Среднее содержание золота по данным традиционного подсчета оказалось на 2,04 % ниже, чем определенное по блочной модели. Разница в запасах золота составила 1,77 %. По ре-

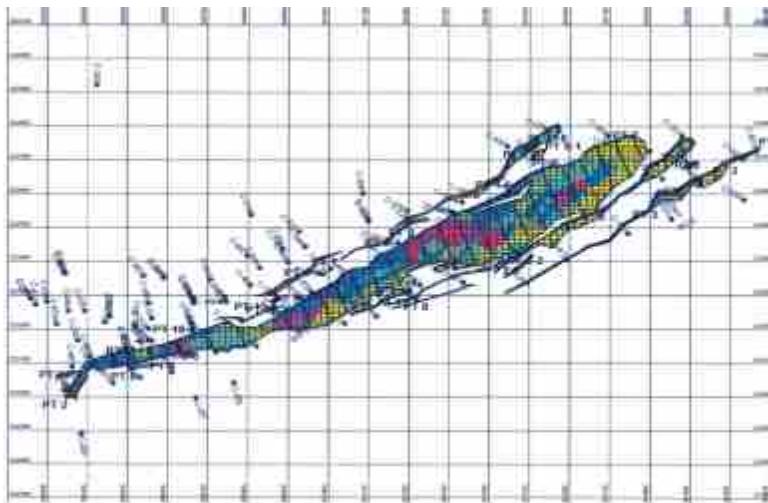


Рис. 7. Холоднинское месторождение. Блочная модель гор. 600 м. Наглядно проявлена анизотропия оруденения

комендации экспертизы объем сравнения геостатистического и традиционного подсчета запасов был увеличен до 50 % запасов руды. Результаты сопоставления подтвердили хорошую сходимость.

Опыт применения геостатистики и использования ГГИТ при государственной экспертизе запасов рудных месторождений свидетельствует о необходимости выполнения ряда требований к соответствующим материалам, представляемым на госэкспертизу.

1. Как отмечалось выше, пробы геологической разведки месторождения и элементарные блоки его геолого-математической модели различаются по геометрическим характеристикам (размерам, объемам и ориентировкам), чем в

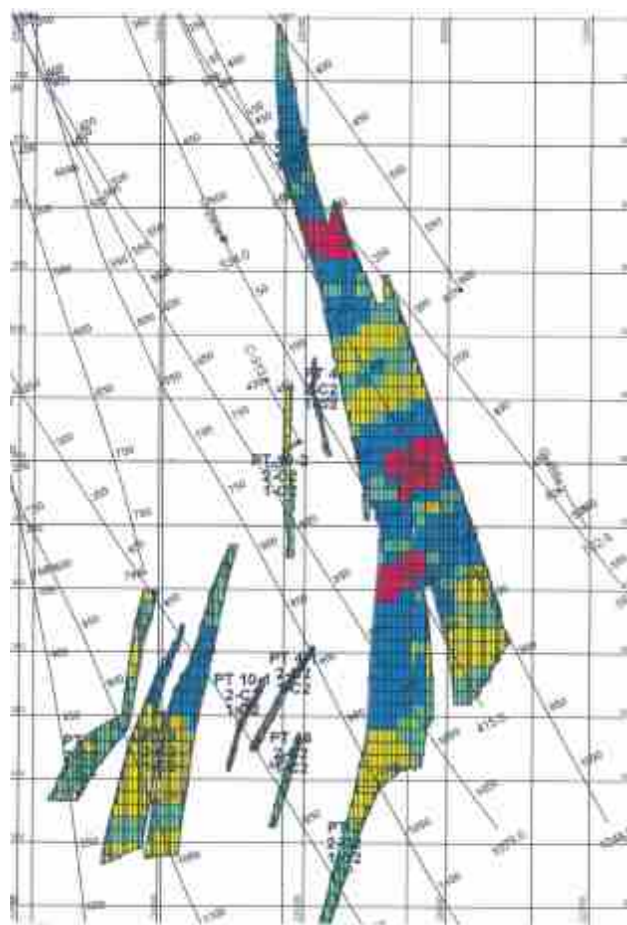


Рис. 8. Холоднинское месторождение. Разрез 52. Структура блочной модели не отражает характера анизотропии пространственного распределения оруденения

общем случае обусловлено различие граничных значений (лимита) содержаний в них полезного ископаемого. Этим различием обусловлено требование установления соотношения между бортовым содержанием полезного ископаемого и его минимальным содержанием (cut-off) в элементарном блоке модели.

2. Вторым кондиционным требованием является необходимость выбора таких размеров элементарного блока модели, которые по ориентировке и величине соответствуют условиям на горнотехнические параметры системы разработки месторождения – минимальной мощности рудных тел и максимальному прослою пустых пород или некондиционных руд.

3. Третье требование – соблюдение условия однородности блоков подсчета запасов с учетом геологических особенностей строения рудных тел и детальности разведки. Это требование российского подсчета запасов соответствует требованию выделения однородных доменов при геолого-математическом моделировании.

4. Одним из основных является требование представления результатов контроля качества геолого-математического моделирования. В качестве критерия качества рассматриваются результаты сопоставления модельного подсчета с подсчетом запасов традиционными методами. При этом учитывается степень совпадения основных подсчетных параметров (запасов руды и компонентов, их средних содержаний), а также ошибки геометризации рудных тел – ошибки построения каркаса месторождения. Для оценки качества моделирования на добывающем предприятии необходимо сопоставление его результатов с результатами эксплуатационной разведки. При оценке качества моделирования должны быть выполнены условия минимального объема сопоставления – 20 % запасов (что может быть увеличено по требованию экспертизы) и охвата сопоставлением всех выделенных на месторождении однородных участков (доменов).

5. Требования к формам представления результатов включают необходимость разделения запасов в поблочных ведомостях по балансовой принадлежности и указания параметров блоков (объемов руды, содержаний компонентов, объемной массы, запасов руды и компонентов) и отражения этой информации на графических документах. Кроме того, необходимо представление собственно результатов геолого-математического моделирования – характеристик статистического распределения содержаний компонентов в элементарных блоках в пределах используемой каркасной оболочки и характеристик пространственного распределения оруденения.

6. В случае использования результатов подсчета запасов для обоснования кондиций в условиях открытой разработки месторождения при повариантных расчетах оптимизация предельного контура карьера выполняется по каждому варианту бортового содержания полезного ископаемого. На экспертизу представляются все варианты оптимизации на основе финансового анализа с характеристикой исходных данных и расчетной величины предельного содержания (cut-off). Предельный контур карьера, оптимизированный алгоритмами ГГИТ по максимальной полноте извлече-

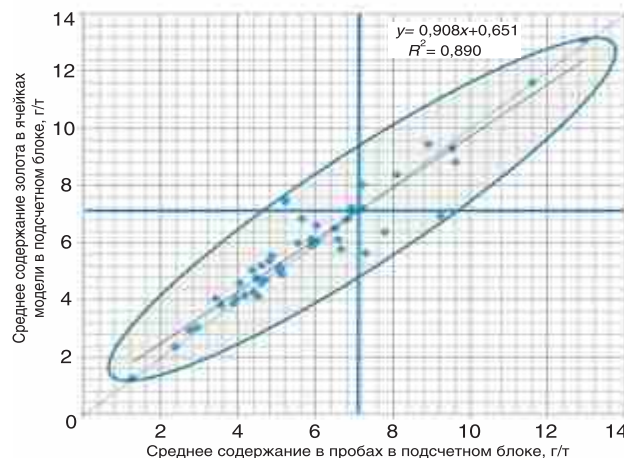


Рис. 9. Корреляционная диаграмма содержаний золота в подсчетных блоках по данным геологического опробования и блочного моделирования. Месторождение Кючус, центральная часть

ния запасов полезного ископаемого при приемлемой для недропользователя рентабельности производства, подлежит проверке и корректировке на основе сопоставления с граничным коэффициентом вскрыши с поуступным оформлением бортов и построением схемы вскрытия.

Прогресс в сближении российской классификации запасов полезных ископаемых с зарубежными классификациями – Международной рамочной классификацией ООН (МРК ООН) и классификацией Комитета по международным стандартам отчетности о запасах твердых полезных ископаемых (CRIRSCO) – служит залогом преодоления существующих проблем оценки методами геостатистики запасов не только российских рудных месторождений, но и всех других месторождений твердых полезных ископаемых. ■

Application of geostatistics methods and mining-geological information technologies in state expert auditing of ore deposit reserves

V. G. Budric, Dr. Sc. (Geol.-Mineral.), Director, Department for Metals, FGU State Commission for Reserves, O. I. Guskov, Prof., Dr. Sc. (Geol.-Mineral.), RGGRU, A. I. Ezhov, Dr. Sc. (Geol.-Mineral.), Director, NP NAEN, P. P. Kushnarev, Chief Expert, Department for Metals, FGU State Commission for Reserves, V. Yu. Markevich, Dr. Sc. (Geol.-Mineral.), Deputy Head, Group for Mathematical Modeling

Application of geostatistics and mining-geological information technologies for state expert auditing of ore deposit reserves is somewhat problematic due to the necessity of harmonization of the principal quality requirements (cut-off grade, minimal thickness of ore bodies and maximum thickness of dirt bands and off-grade beds) applicable in the Russian mineral resources management practice and characteristics (concentrations, size and orientation) of blocks of geostatistical models of ore deposits. These problems can be solved in the process of harmonization of the Russian and international standards for estimation of mineral resources.

Key words: ore deposits, estimation of reserves, quality requirements, geostatistics, mining-geological information technologies, block modeling.