



**И.И. Градовский**  
канд. геол.-мин. наук  
ЗАО Полюс  
заместитель начальника  
отдела подсчета запасов



**П.И. Кушнареев**  
канд. геол.-мин. наук  
ЗАО Полюс  
начальник  
отдела подсчета запасов  
kushnarevpi@polyusgold.com

# Приемы блочного моделирования золоторудных месторождений при разработке ТЭО

*Авторы рассматривают приемы блочного моделирования, позволяющие добиться удовлетворительной сходимости его результатов с данными традиционного подсчета запасов*

*The authors examine the block modeling techniques, allowing to achieve satisfactory convergence of its results with the data of the traditional calculation of reserves*

**Ключевые слова:** оценка запасов, блочное моделирование, сходимость результатов, индикаторный кригинг  
**Keywords:** estimation of reserves, block modeling, convergence of the results, indicator kriging

**В** настоящее время результаты блочного моделирования достаточно часто представляются на государственную экспертизу при разработке ТЭО. При этом на его основе решаются следующие задачи:

- проведение повариантной оценки запасов;
- оптимизация планов ведения горных работ, в том числе оптимизация контуров проектных карьеров;
- определение календарных графиков отработки месторождений.

Решению этих задач способствует наличие разнообразных программных продуктов (*Datamine, Micromine, Surpack* и др.). Применение блочных моделей позволяет значительно сократить время подготовки ТЭО.

Оперативное получение результатов геолого-экономической оценки месторождения на основе блочного моделирования позволяет недрополь-

зователям приступить к подсчету запасов по выбранному варианту кондиций. Подсчет запасов, как правило, проводится традиционным методом, требующим значительных затрат времени на проведение подсчетных операций и создание отчетных документов, в том числе табличных и графических приложений. В результате ТЭО и подсчет запасов месторождения могут представляться на госэкспертизу совместно; такое представление является обычной практикой оценки месторождений.

Золоторудные месторождения, представляемые на госэкспертизу в последнее время, относятся, как правило, к объектам штокверкового типа, для которых характерно отсутствие четких геологических границ. Это определяет их оконтуривание по данным опробования; при разработке ТЭО для решения этой задачи рассматриваются варианты кондиционных показателей,

особенно варианты бортовых содержаний золота. Чаще всего отработка этих месторождений предполагается открытым способом.

В существующих программных продуктах оценка запасов и решение многих вопросов, связанных с освоением месторождения, предполагается в автоматизированном режиме, что определяет их несомненную привлекательность. Вместе с тем, практика их применения в российских условиях недропользования показывает, что результаты блочного моделирования месторождений не всегда отвечают существующим нормативно-методическим требованиям.

Одним из этих требований является сходимость результатов оценки запасов по блочной модели с данными традиционного подсчета запасов. В значительном числе случаев, когда для оконтуривания объекта по пробам и по элементарным блокам принимается единый уровень содержаний золота (бортовое содержание и *cut-off-grade*), по блочной модели в сравнении с традиционным подсчетом наблюдается увеличение запасов руды при снижении среднего содержания золота. Эти расхождения, как правило, увеличиваются при повышении уровня предельных содержаний (рис. 1).

Такая особенность часто не позволяет использовать результаты блочного моделирования при обосновании ТЭО.

Рассмотрим приемы блочного моделирования, позволяющие добиться удовлетворительной сходимости его результатов с данными традиционного подсчета запасов.

Основной (ключевой) причиной расхождения результатов оценки запасов разными методами является различие в принципах и результатах оконтуривания оруденения. Само несовпадение выделенных объемов руды говорит о том, что запасы оцениваются в разных границах, в связи с чем не следует ожидать сходимости других параметров подсчета.

В рамках *традиционного подсчета* основой для определения границы «руда-не руда» является рудный интервал, выделенный с учетом всех требований кондиций и, особенно с учетом бортового содержания, которое определяет положение краевой пробы. Оконтуривание сплошных рудных тел производится по границам интервалов, что в значительной мере определяет их однозначность. В случае, когда выделение сплошных рудных тел невозможно и подсчет производится с использованием коэффициента рудоносности, предполагается, что такие сплошные рудные тела могут быть выделены при сгущении разведочной сети. В дальнейшем, в процессе эксплуатации месторождения, эти тела будут являться объектом отработки.

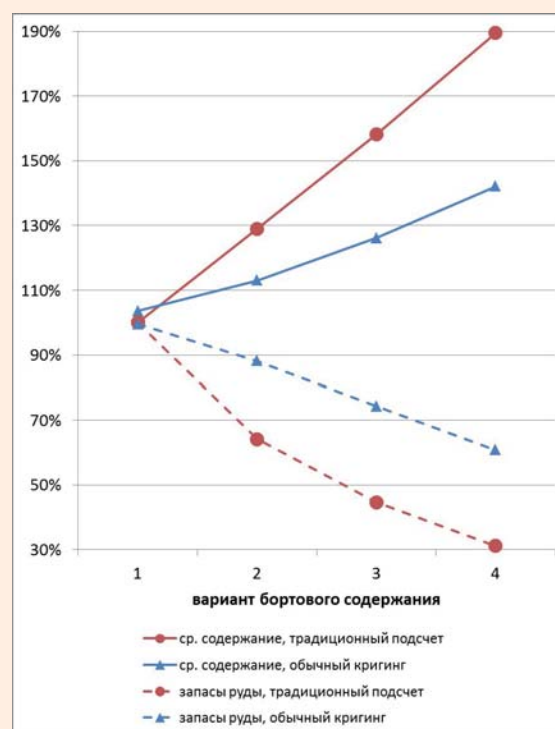


Рис. 1.

Расхождение результатов подсчета запасов традиционным методом и по блочной модели

При *блочном моделировании* границы объекта проводятся по ячейкам модели, содержание компонента в которых превышает установленный предельный уровень (*cut-off-grade*). В расчете (интерполяции) содержаний в ячейках участвуют «законтурные пробы», что считается недопустимым с позиций традиционного подсчета. Таким образом, граница объекта при блочном моделировании является опосредованной, т.е. полученной расчетным путем.

Результаты расчетов зависят от разнообразных факторов. В их числе можно отметить размеры ячеек, тип интерполяции (кригинг по видам, метод обратных расстояний, способ ближайшего соседа и т.п.), ориентировку в пространстве и размеры поискового эллипсоида, число учитываемых проб и др. Определенную роль играет длина композитов, а также положение начальной точки для определения положения ячеек модели и композитных проб. С этих позиций граница объекта по блочной модели становится, во многом неопределенной или неоднозначной.

Для преодоления этих разногласий в отдельных случаях предлагается использовать для оконтуривания объекта при подсчете запасов традиционным способом и методом блочного моделирования разные уровни бортового содержания и значения *cut-off-grade (COG)*. Это предложение оправдывается тем, что отдельная проба и ячейка блочной модели имеют разную гео-

метрию и характеризуют разные объемы недр. Соответственно, по ним различаются статистические характеристики распределения компонентов. Разделение (сортировка) этих распределений по единому значению признака приводит к разным результатам; по выборке из проб для значений выше установленного лимита среднее содержание будет всегда выше, чем среднее по выборке из ячеек модели.

На *рис. 2* представлены распределения содержания золота по пробам сопровождающей эксплуатационной разведки (верхняя часть) и по элементарным ячейкам блочной модели (нижняя часть). Видно, что исходные совокупности характеризуются различными типами и параметрами статистических распределений. По принятому лимиту (0,4 г/т) эти совокупности разделяются в разной пропорции.

Результаты расчетов геологоразведочных параметров по разным способам подсчета и по вариантам бортового содержания для данного примера представлены в *табл. 1*.

Из данных *табл. 1* видно, что средние содержания золота по исходным совокупностям практически не различаются. При разделении их по единому уровню лимита 0,4 или 0,5 г/т средние содержания компонента различаются на 25–26%. Аналогичным образом, на 13–19% различаются и доли выделенных «рудных» объемов.

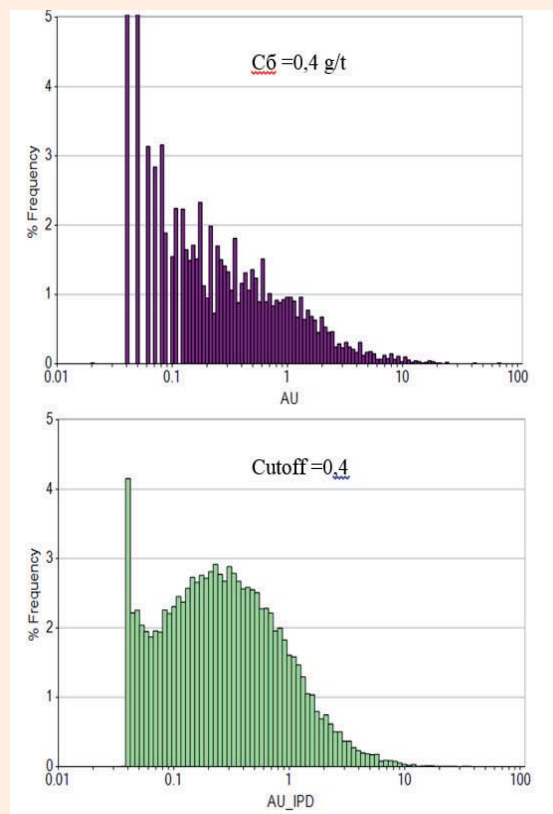
Методом подбора, в принципе, можно найти значения бортового содержания и *COG*, при которых обеспечивается сходство объемов и средних содержаний компонента в оконтуренном объеме недр. Для приведенного примера можно говорить о том, что более полное совпадение показателей достигается в том случае, если бортовому содержанию 0,4 г/т будет соответствовать *COG* = 0,5 г/т. Следует отметить, что никогда невозможно добиться полного сходства по всем оцениваемым параметрам.

Рассмотренный прием может использоваться только для одного уровня бортового содержания. При повариантном подсчете запасов, необходимым для ТЭО, его применение создает существенные сложности при оценке содержаний в межбортовых «прорезках».

Соблюдение единых принципов оконтуривания возможно тогда, когда блочное моделирование осуществляется в каркасах, построенных на основе рудных интервалов, предварительно выделенных по установленным кондиционным показателям. В этом случае в расчетах по каждому из методов участвуют одни и те же пробы. Кроме того, обеспечивается равенство оцениваемых объемов недр. Композитирование проб для целей блочного моделирования производится только в пределах выделенных каркасов. Важным усло-

Рис. 2.

Гистограммы распределения содержания золота по пробам и элементарным блокам модели



вием моделирования во всех случаях является максимально полный учет особенностей геологического строения объекта. Этому условию способствует корректное построение (увязка) каркасов, разделение их на однородные по геологическому строению и степени разведанности части – домены, а также использование процедур динамической анизотропии или *unfolding*, обеспечивающих изменение ориентировки поискового эллипсоида в пространстве в зависимости от геологической ситуации (*рис. 3*).

Использование этого приема в подавляющем большинстве случаев обеспечивает сходство геологоразведочных параметров для разных способов оценки. Некоторые различия в них объясняются, чаще всего, неравномерностью разведочной сети внутри выделенного объема.

При повариантном подсчете запасов применение единых принципов оконтуривания осложняется необходимостью построения каркасов для каждого значения бортового лимита. Эта операция является достаточно трудоемкой и малопригодной в связи с большими затратами времени. Вместе с тем, для решения поставленных задач можно использовать дополнительный прием, базирующийся на процедуре индикаторного кригинга.



Задачей индикаторного кригинга в данном случае является автоматизированное определение границ рудного тела для каждого варианта бортового содержания. Предварительно по разведочным пересечениям, входящим в оцениваемый объем, для соответствующего значения бортового содержания выделяются рудные интервалы. Предлагаемая модификация процедуры индикаторного кригинга заключается в том, что индекс 1 присваивается всем пробам, попавшим в выделенный рудный интервал. Пробам, расположенным вне рудных интервалов, присваивается индекс 0, хотя в некоторых из них содержание компонента может превышать бортовой лимит. Далее для всех ячеек модели по известным алгоритмам рассчитываются значения индикатора. При интерполяции значений индикатора в ячейки модели также рекомендуется учитывать геологические особенности объекта выделением доменов или/и ориентировкой поискового эллипсоида (рис. 4).

Граничное значение индикатора, относительно которого происходит разделение ячеек на «рудные» и «безрудные», может быть принято равным 0,5. Эта величина соответствует правилу проведения контуров при традиционном подсчете на половину (1/2) расстояния между разведочными пересечениями.

Следует иметь в виду, что при традиционном подсчете запасов оконтуривание рудных тел в сечениях (разрезах) проводится с использованием разных приемов выклинивания (рис. 5), которые, в целом, дают несколько заниженные значения мощности на границе залежи. Как видно на рис. 4, значения мощности на контакте, в зависимости от принятой процедуры оконтуривания, могут изменяться от 0 до 0,5 (редко более) мощности рудного тела. В совокупности, в сравнении с формальным распространением полной мощности рудного интервала на всю зону его влияния, эти методы оконтуривания дают заниженные площади в сечениях и соответственно, заниженные объемы руды.

Определение границ по индикатору 0,5 теоретически должно полностью соответствовать формальному способу оконтуривания (рис. 5а). Применение других приемов оконтуривания (рис. 5б, 5в, 5г) может приводить к некоторому расхождению объемов по блочной модели и по традиционному подсчету. Это различие будет тем выше, чем больше доля краевых пересечений в предлагаемом подсчете. Можно заметить, что подсчет запасов с использованием коэффициента рудоносности также фактически соответствует по результатам формальному подходу к оконтуриванию (рис. 5а). Некоторая разница объемов в этом случае будет определяться

Параметры запасов по пробам и блокам при разной величине лимита

Таблица 1

Объект	Параметр	Предельное значение содержаний, г/т		
		0	0,4	0,5
пробы	среднее содержание, г/т	0,54	2,26	2,69
эл. блоки		0,55	1,79	2,16
пробы	доля объема	1	0,200	0,156
эл. блоки		1	0,247	0,180

неравномерностью разведочной сети внутри объектов оценки.

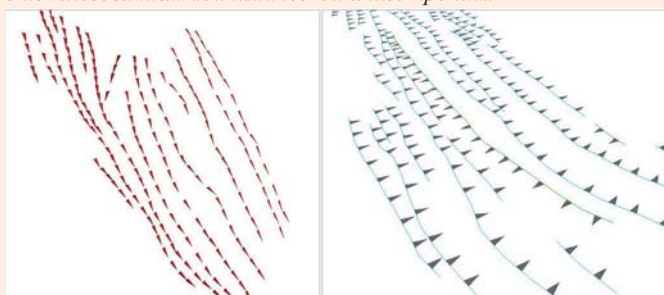
В целом, для устранения различий в определении объемов руды можно говорить о введении поправок в величину индикатора или о его *та-рировании*. Величину поправки можно надежно определить тогда, когда проведена заверка результатов блочного моделирования традиционным методом. В остальных случаях величина индикатора с соответствующим обоснованием для разных значений бортового лимита может приниматься в пределах 0,4–0,6.

После создания индикаторной модели в «рудные» ячейки проводится интерполяция содержания полезного компонента с использованием только тех проб, которые попали в границы рудных интервалов. Интерполяция проводится с применением обычных известных процедур (кригинг, методы обратных расстояний, условного моделирования и т.п.).

**Проведение традиционного подсчета** запасов, требуемого для заверки данных блочного моделирования, является во многих случаях достаточно трудоемкой операцией. Результаты традиционного подсчета по какому-либо варианту кондиций могут появиться значительно позже, чем будут оценены запасы по блочной модели, необходимые для разработки ТЭО кондиций. Получение данных для заверки блочной модели по другим вариантам кондиций, даже в сокра-

Рис. 3.

Пример моделирования элементов залегания рудных тел на разрезе и на плане горизонта для выполнения интерполяции с использованием «динамической анизотропии»



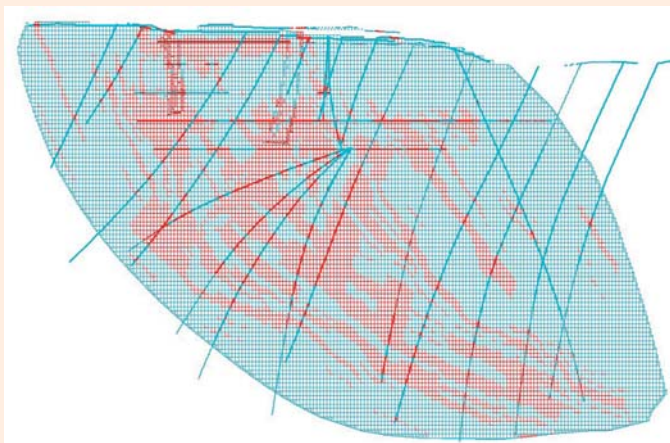


Рис. 4.

Пример индикаторной модели, построенной по рудным интервалам в «свободной» оболочке (голубое)

щенном объеме, также потребует дополнительных усилий и времени.

Решение задачи оценки качества блочного моделирования, в соответствии с требованиями ГКЗ, чаще всего ведется в едином контуре минерализованной зоны при разных значениях коэффициента рудоносности ( $K_p$ ) по вариантам кондиций. В то же время информация о динамике изменения геологоразведочных параметров в зависимости от показателей кондиций может быть оперативно получена в результате геологического анализа. Он проводится на основе автоматизи-

Соотношение запасов руды и металла и средних содержаний, посчитанных традиционным и геостатистическим методами для ряда объектов

Таблица 2

Объект	Вариант Сб	Соотношение трад. подсчет/ БМ, %		
		запасы руды	среднее содержание	запасы металла
Наталка (АУ)	0,4 (г/т)	98	99	97
	0,6	91	99	90
	0,8	94	100	94
	1	98	100	98
Дедекан (АУ)	0,4 (г/т)	118	95	112
	0,6	111	96	106
	0,8	106	98	104
	1	103	100	103
Перевальное (АУ)	0,5 (г/т)	106	97	103
	1	104	96	100
	1,5	106	92	97
	2	100	95	94
Горное (У)	0,01(%)	99	101	100
	0,03	100	102	102
	0,06	101	101	102

рованного выделения рудных интервалов по всем разведочным пересечениям. Предварительно разведочные пересечения следует сгруппировать на выборки с учетом плотности разведочной сети для каждой из категорий разведанности запасов. Для корректного применения кондиций по каждому разведочному пересечению следует произвести пересчет длины проб на истинную, горизонтальную или вертикальную мощность в зависимости от условий залегания рудных тел. В случае различия показателей и динамики их изменения по отдельным выборкам усредненная характеристика параметров вычисляется с учетом статистического веса каждой выборки. Такой прием не требует существенных затрат времени, особенно если по объекту создана качественная база данных.

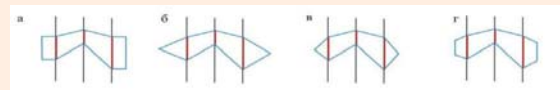


Рис. 5.

Примеры выклинивания рудных тел на разрезах

Полученные величины средних содержаний компонента по вариантам могут рассматриваться в качестве контрольных цифр для сопоставления с данными блочного моделирования. Аналогичным образом правильность оценки других параметров подсчета – запасов руды и запасов металла – может быть оценена на основе изучения динамики изменения их по вариантам кондиционных показателей. По результатам геологического анализа по вариантам кондиций рассматривается изменение суммарной длины рудных интервалов, выступающей как характеристика запасов руды, и изменение суммарного метраграмма как аналога запасов металлов. Критерием качества блочного моделирования может служить сходство графиков изменения этих параметров.

Опыт применения авторами указанных подходов к созданию блочных моделей при защите ТЭО в ГКЗ для ряда объектов показывает, что с их помощью удается добиться удовлетворительного сходства параметров по блочной модели и по традиционному подсчету (табл. 2).

Блочная модель, положенная в основу ТЭО по Наталкинскому золоторудному месторождению, прошла госэкспертизу и получила одобрение в ФБУ ГКЗ.

Представляется, что изложенные приемы можно применять не только на золоторудных месторождениях, но и на всех объектах твердых полезных ископаемых, требующих проведения повариантного подсчета запасов и создания блочных моделей для разработки ТЭО.