

ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ БЛОЧНОЙ ГЕОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

С. В. ПЕТРОВ (Санкт-Петербургский государственный университет), П. М. МИШУЛОВИЧ (ООО «Арджейси Консалтинг»), В. В. СМОЛЕНСКИЙ (Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г. В. Плеханова (технический университет))*

В статье показано создание геолого-технологической модели молибденового месторождения. С применением индикаторного кригинга рассчитана блочная модель типизации руд по технологическим свойствам. По кривым зависимостей извлечения для типов руд определен параметр извлечения молибдена в концентрат для каждого блока модели.

Ключевые слова: геолого-технологическое картирование, блочное моделирование, молибденовые руды, технологические свойства.

Многие добывающие предприятия, в том числе и в Российской Федерации, для планирования горных работ применяют горно-геологические системы на основе блочных моделей. Использование этих систем направлено на оптимизацию процесса добычных работ, в результате которого путем усреднения рудных потоков или управления ими горнодобывающее предприятие выдает товарную руду строго определенного и постоянного качества.

В настоящее время для планирования горных работ широко используются блочные модели, построенные на основе содержания главного полезного компонента руд, а в ряде случаев, для месторождений комплексных руд, по расчетному условному содержанию. Однако на большинстве месторождений планирование горных работ по содержанию главного полезного компонента не приводит к устойчивой работе обогатительного предприятия, поскольку в товарной руде оказывается шихта различных технологических сортов в динамично изменяющихся соотношениях. Такая шихта может иметь постоянные качественные характеристики по содержанию главного полезного компонента, но резко различные технологические свойства. Это характерно прежде всего для медно-молибденовых, полиметаллических и медно-цинковых колчеданных, медно-никелевых, благороднометаллических, оловянных, оловянно-полиметаллических и других типов месторождений [1]. При планировании работ на таком горном предприятии большую роль играют не только содержание металла в руде, но и другие вещественные характеристики, определяющие возможность его извлечения [1, 2]. В условиях действующих предприятий технологические характеристики руды могут учитываться тремя способами:

1) технологической типизацией руды и оконтуриванием достаточно крупных геологических объемов

* Петров Сергей Викторович — доцент, petrov64@gmail.com; Мишулович П. М. — ведущий геолог, Pmishulovich@rjcggroup.ru; Смоленский В. В. — доцент smolensk@spmi.ru.

с рудами одинаковых сортов с последующей селективной выемкой и усреднением;

2) использованием зависимостей между показателями качества руды и извлечением полезного компонента в концентрат непосредственно в процессе обогащения путем изменения режимов рудоподготовки, флотации и т. д.;

3) построением блочной геолого-технологической модели (БГТМ).

Исходными данными для построения моделей первого типа являются данные геолого-технологического опробования и результаты прямых технологических испытаний средних проб, усредненных по добычным блокам. В целом, создание модели такого типа является, по-видимому, самым правильным, однако не лишенным некоторых недостатков. Наиболее существенными недостатками являются дискретность оценок обогатимости и хроническое запаздывание создания модели. Как правило, подобные модели на практике применяются для обоснования потерь и провалов в работе обогатительного предприятия. Для получения функциональных зависимостей между показателями качества руды и результатами ее обогащения обычно используются данные геолого-технологического картирования и лабораторных технологических исследований. Недостатком этого способа моделирования является низкая точность из-за несоответствия технологических показателей, полученных в лабораторных условиях, реальным фабричным показателям. Для осуществления моделирования требуется разработка методики типизации в потоке рудной массы, кроме того, аналитические зависимости, полученные на ограниченном объеме данных, требуют постоянного и интерактивного обновления. А этот процесс, как показывает практика, также приводит к существенному загромождению прогноза. И, конечно, данный способ может успешно применяться только для монометаллических руд относительно простого вещественного состава.

Оба способа моделирования обогатимости руд довольно подробно разработаны и используются в практической деятельности [1].

Третья группа моделей является инновационной, ее методология разработана в компании «Арджейси». Она предназначена для месторождений, в которых весьма слабо проявляются фундаментальные зависимости между качеством руды и ее обогатимостью. Построение БГТМ еще не вошло в практику горнодобывающих работ, поэтому в данной статье приводится опыт разработки такой модели и обсуждается алгоритм ее создания и апробации.

Алгоритм создания БГТМ показан на примере месторождения молибденитовых руд, расположенного в Забайкалье.

Основной метод переработки молибденитовых руд флотационный. Молибденит из руд любых типов и сортов с помощью флотации извлекается в коллективный концентрат, а оттуда при помощи нескольких перемешиваний — в селективный кондиционный товарный продукт. Из хвостов молибденовой селекции часто получают медный концентрат. Физической основой данного метода обогащения является чешуйчатое аполлярное строение кристаллов минерала, вследствие которого его поверхность слабо взаимодействует с дипольными молекулами воды (не смачивается). Молибденит — один из немногих естественнофлотируемых минералов, однако всякое изменение его свойств существенно сказывается на результатах флотации. Прежде всего это относится к морфологии его кристаллов и агрегатов, размерам, характеру деформаций и окислению поверхности минеральных частиц. Поскольку во флотационном процессе участвует не только молибденит, но и все минералы, ассоциирующие с ним в рудах, результат флотации зависит также и от свойств сопутствующих минералов. Вследствие этого количество геолого-минералогических факторов, определяющих технологические свойства руд молибденового месторождения, весьма велико (таблица).

Очевидно, что напрямую учет такого большого количества факторов для построения графической типовой или алгебраической модели месторождения и оптимизации графика отработки руд (с целью составления оптимальной, устойчивой по вещественным характеристикам рудной шихты) не представляется возможным. Статистический анализ показал отсутствие фундаментальных зависимостей между показателями качества руды и ее технологическими свойствами (рис. 1).

Создание БГТМ месторождения включает следующие этапы работ.

1. Сбор и подготовка исходных данных для статистических исследований, являющиеся одной из главных стадий работы. Исходные данные должны содержать одновременно и вещественную, и технологическую информацию. Для этой цели могут использоваться следующие массивы данных:

— база данных опробования скважин детальной и эксплуатационной разведки с учетом сведений по петрографическому составу вмещающих пород, метасоматическим изменениям, вещественному составу оруденения и качественным характеристикам главных рудных минералов (на основе этой базы производится моделирование распределения типов руд в пространстве и построение классической блочной модели месторождения);

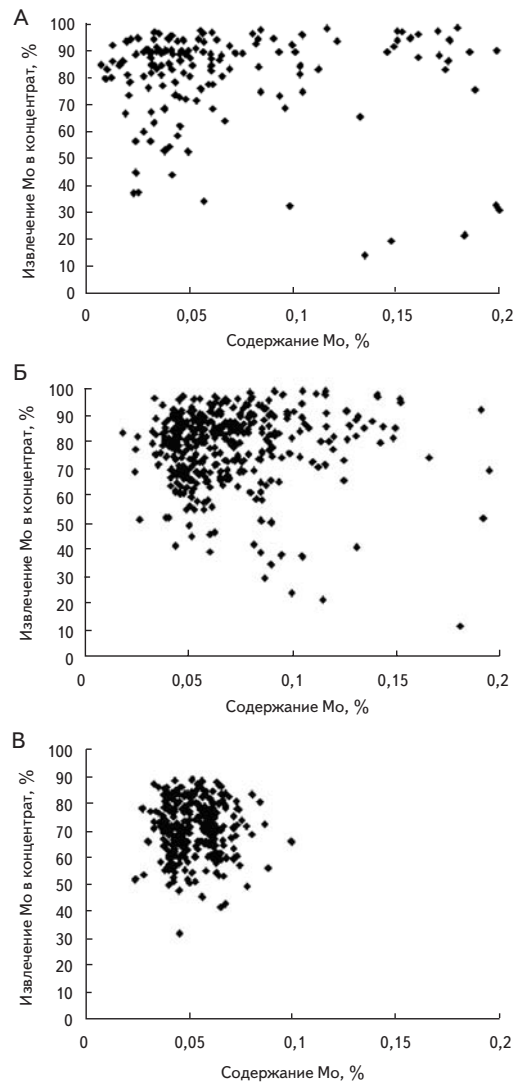


Рис. 1. Графики, иллюстрирующие отсутствие зависимости между содержанием молибдена в руде и его извлечением во флотационный концентрат:

А — по данным геолого-технологического картирования (150 проб); Б — по данным опережающего технологического опробования (397 проб); В — по данным работы обогатительной фабрики (296 суток)

— результаты геолого-технологического картирования на основе исследования малообъемных технологических проб, которое проводится на стадии детальной разведки месторождения (эти данные необходимы для определения функциональных зависимостей между вещественными характеристиками руд и результатами их обогащения, для установления и ранжирования факторов, определяющих обогатимость руд);

— данные опережающего технологического опробования, выполняемого специалистами геологической службы и исследовательской технологической лаборатории предприятия (результаты этого опробования хорошо сопоставляются с результатами работы обогатительной фабрики, поэтому они послужили основой для изучения особенностей пространственного распределения технологических типов руд

Факторы вещественного состава руд молибденового месторождения и их технологическое значение (с учетом данных [1, 3])

Характеристики вещественного состава руды	Технологические явления, связанные с действием фактора	Рамки проявления фактора
Количество молибденита	Извлечение минерала растет одновременно с его содержанием	Повышение содержаний наблюдается в зонах наиболее проявленных метасоматитов (калишпатовых, кварц-серицитовых, аргиллизитах). При содержании молибдена сульфидного более 0,1 % практически все руды легкообогатимые
Размеры частиц молибденита	Раскрытие из минеральных сростаний падает с уменьшением размера кристаллов	Размер кристаллов и агрегатов растет одновременно со степенью калишпатизации пород, очень крупный молибденит плохо поддается измельчению
Характер деформаций и морфология частиц молибденита	Селективное раскрытие молибденита Дефектность и деформированность чешуек снижает флотоактивность минерала через изменение электрических свойств его поверхности	Накопление во фракции $-0,3 + 0,04$ мм Деформированность зерен молибденита зависит от характера сростаний и степени проявления тектоники. Флотоактивность молибденита повышается в кристаллах с устойчивой термоЭДС дырочного типа
Окисление поверхности молибденита	Группы ОН- (а также примазки ферримолибдита и повеллита) на поверхности частиц снижают флотоактивность, вызывая увеличение расхода реагентов, и ухудшают качество концентратов	Степень окисления поверхности чешуек молибденита повышается к поверхности месторождения, резкое падение извлечения наблюдается уже при 5–10-процентной степени окисления молибдена
Наличие смеси каолинита, гидрослюд, хлоритов, прочих дисперсных силикатов с примесью сульфатов и гидроксидов	Увеличение расхода реагентов и падение извлечения из-за присутствия минералов с большой удельной поверхностью вследствие сорбции флотационных реагентов на поверхности частиц шламов, коагуляции пульпы, нарушения условий свободного падения частиц, связывания пузырьками воздуха частиц сульфидов	Количество шламов растет при приближении к тектоническим зонам и непосредственно в них. Увеличение содержания шламов на 0,5 % приводит к падению извлечения на 2–3 %
Присутствие в рудах каолинита и гидрослюд	Снижают качество концентратов и извлечение металла в них	Ухудшение качества одновременно с ростом степени аргиллизации руд, извлечение падает (на 4–8 % в коллективный концентрат) в наиболее измененных породах
Присутствие монтмориллонита	Снижает качество концентратов и извлечение металла в них, вызывает повышенный расход реагентов вследствие сорбции	Появляется только в тектонических зонах в т. н. «глинистых рудах»
Присутствие мусковита и гидромусковита	Влияет на процесс сгущения и фильтрации пульпы	Политип мусковита 1М оседает на порядок дольше, чем политип 2M ₂
Наличие в рудах растворимых солей (присутствие сульфатов железа, меди, кальция, растворимых в воде)	Дисперсные золи Fe(OH) ₃ , ионы Fe ³⁺ депрессируют флотацию молибденита	Присутствие в пульпе в количестве 2 мг/л приводит к падению извлечения на 10 % (окисленные и смешанные руды)
	Депрессирующее влияние на молибденит оказывают ионы Al ³⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , особенно в процессе селекции коллективного концентрата	Увеличение общей минерализации пульпы с 50 до 150 мг/л уменьшает извлечение на 2–5 %, а до 2000 мг/л — на 12–18 % (тектонические зоны)
Присутствие цеолитов, углистого вещества	Сорбция реагентов	Тектонические зоны, влияние проявляется при содержании более 0,5 % (влияние практически не изучено)

и построения рабочих аналитических зависимостей между показателями качества руды и ее обогатимостью);

— данные работы обогатительной фабрики (сменные и суточные сводки, необходимые для подтверждения полученных зависимостей и построенных моделей).

2. Статистические исследования с целью определения функциональных зависимостей между показателями качества руды и ее технологическими характеристиками. Основные статистические методы, используемые для обработки данных: корреляционный анализ, метод главных компонент факторного анализа, регрессионный анализ.

3. Анализ вещественных критериев обогатимости. На основе зависимостей, полученных на предыдущем

этапе работ, необходимо выявить вещественные критерии обогатимости и произвести классификацию руд путем выделения объемов руды с устойчивыми вещественными характеристиками и стабильными технологическими показателями — природные типы руд (минеральные разновидности). Однако в нашем примере такая типизация оказалась невозможной по ряду причин, главные из которых обилие факторов, определяющих обогатимость, «непредставительный» характер проб (поскольку все пробы технологического опробования являются смесями природных типов), скудность информации о вещественном составе рядовых проб и т. д.

4. Типизация руд на основе их технологических свойств. В случае если надежное определение технологических свойств руд по их вещественным харак-

теристикам, даже с учетом разделения на природные типы руд, оказывается невозможным, проводят прямую типизацию руд месторождения на основе их технологических свойств (выделяя легко-, средне- и труднообогатимые сорта руд по данным опережающего технологического опробования).

5. Распознавание технологического сорта руды по базе данных рядового опробования в зависимости от ее вещественного состава.

По результатам статистических исследований данных опережающего технологического опробования и геологических наблюдений разрабатываются критерии распознавания технологических сортов руды на основе имеющейся информации (морфология рудных минералов, петрографический состав пород, характеристика наложенных процессов, тектонические проявления и т. п.). В результате база данных опробования скважин детальной и эксплуатационной разведки преобразуется в базу данных для распознавания технологических типов руд.

Поскольку при геологическом описании рядовых проб керна скважин детальной и эксплуатационной разведки, отобранных в разное время, приводится различный набор информации, необходимо проводить пошаговое распознавание с постепенным увеличением признаков. На каждом шаге распознавания строится гистограмма распределения сортов руды, которая сравнивается с гистограммой распределения типов, построенной по результатам прямых технологических испытаний на пробах опережающего технологического опробования. С помощью этой методики в нашем примере на пятом шаге процесса получено практически идеальное совпадение гистограмм распределения сортов руд. При этом надежное распознавание достигнуто для 65 % рядовых проб (более 16 тысяч). В распознавании участвуют четыре группы факторов:

- фактор окисленности руд;
- тектонический фактор (контролирующий присутствие и распределение дисперсных и химически активных минералов);
- метасоматический фактор (контролирующий распространение метасоматических пород на месторождении — калишпатовых, серицитовых, окварцованных и аргилизитовых);
- общее суммарное содержание фазовых форм молибдена (окисленного и сульфидного).

В результате двум третям проб в базе рядового опробования был присвоен код принадлежности к сорту руды: легкообогатимой, среднеобогатимой или труднообогатимой (рис. 2).

6. Расчет в блочной модели доли каждого технологического сорта руды в каждом блоке. Перед началом построения вариограмм производится перерасчет данных опробования для приведения длины всех проб к одной длине. По каждому сорту руды строится своя всенаправленная индикаторная вариограмма. В нашем примере решение использовать всенаправленные вариограммы обусловлено тем, что обогатимость зависит от многих факторов, имеющих различную ориентацию в пространстве. Все вариограммы трехструктурные и аппроксимированы сферическими моделями. Максимальный радиус влияния по вариограммам составил (м): для легкообогатимых

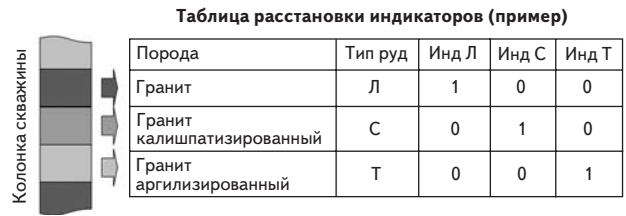


Рис. 2. Индикаторное кодирование базы данных

руд — 296, среднеобогатимых — 301, труднообогатимых — 352, хотя радиус влияния наиболее значимой второй структуры составляет для тех же типов руд 140, 76 и 74 м соответственно.

Для расчета модели обогатимости используются созданная база данных технологических сортов руд и метод индикаторного кригинга [4–7]. Расчет производится на основе полученных вариограмм, в результате в каждом блоке модели интерполируются доли каждого сорта руд. Для поиска данных использовалось несколько шаров (эллипсоидов) поиска с разными радиусами: для первого процесса интерполяции — радиус влияния первой структуры, для второго — радиус влияния второй структуры и для третьего — радиус влияния третьей структуры.

7. Расчет обогатимости в блочной модели месторождения каждого технологического сорта руды в каждом блоке. Так как извлечение молибдена в концентрат в каждом сорте руд зависит от содержания металла, то индикаторная модель сортов руд была объединена с моделью содержаний (рассчитанной методом ординарного кригинга). Таким образом, для каждого блока модели получены значения содержания молибдена и соотношения сортов руд. Извлечение молибдена в концентрат по каждому сорту руд в каждом блоке рассчитывалось отдельно по формулам, полученным с помощью регрессионного анализа технологических (?) на пробах опережающего технологического опробования (рис. 3).

Общее технологическое извлечение в блоке рассчитывалось как средневзвешенная сумма извлечений каждого сорта руды в соотношении, рассчитанном индикаторным кригингом.

Для проверки рассчитанной блочной модели были построены каркасы добычных блоков с известным коэффициентом извлечения (рис. 4). Блочная модель была закодирована этими каркасами, в результате по каждому добычному блоку был получен прогноз извлечения, который сравнивался с уже известным коэффициентом. Относительная ошибка прогноза по данным сопоставления результатов технологического опробования 56 блоков составила 13 %. При этом основная ошибка прогноза формируется только по определенной части добычных блоков. Блоков с крайне высокой ошибкой прогноза (абсолютные значения достигают 42 %) всего менее 10 % от общего числа, и располагаются они исключительно на верхних горизонтах месторождения, в области распространения труднообогатимых окисленных или смешанных руд. По всей видимости, при прогнозировании технологических свойств этих руд были учтены не все важные вещественные характеристики, что и привело к ошибкам распознавания сорта руды, а да-

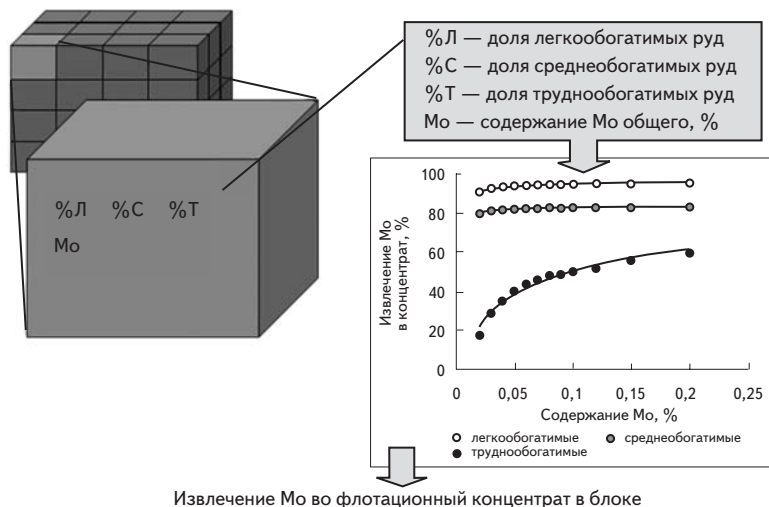


Рис. 3. Алгоритм расчета доли технологических сортов руды в каждом блоке блочной модели месторождения и определение извлечения молибдена во флотационный концентрат

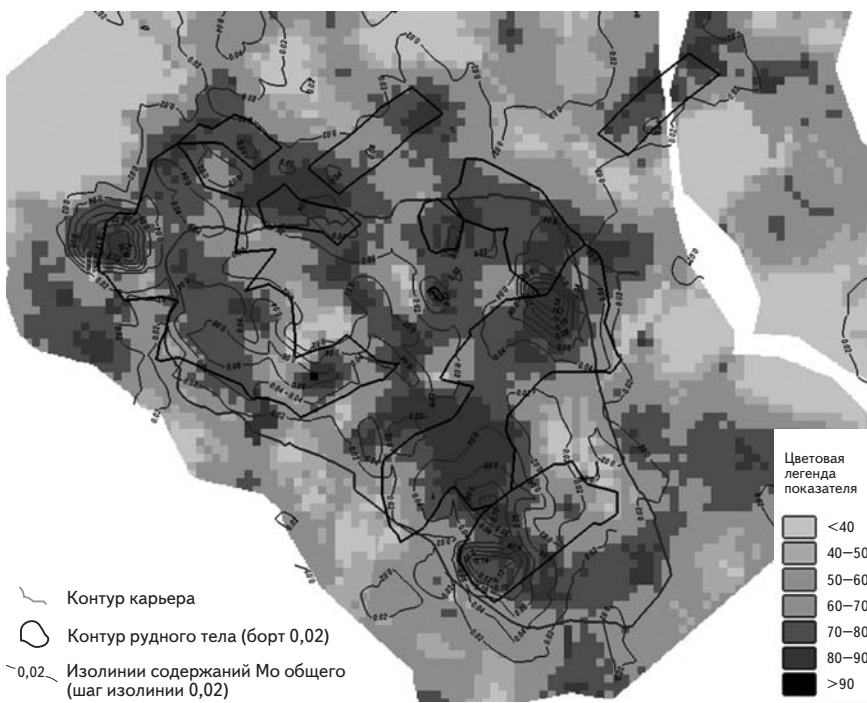


Рис. 4. Блочная модель, раскрашенная по коэффициенту извлечения. Цветом показаны градации значений извлечения молибдена в концентрат

лее — к ошибкам прогнозирования. С глубиной отработки месторождения ошибка прогнозирования извлечения молибдена из руды уменьшается. Это

объясняется: стабилизацией качества руды; уменьшением числа влияющих на обогатимость геологических факторов; улучшением работы геологической службы ГОКа и исследовательской технологической лаборатории. Для нижних горизонтов месторождения, которые находятся в отработку в настоящее время, ошибка прогнозирования значительно ниже: абсолютное отклонение — 1,4 % (среднее по семи добычным блокам), а относительная ошибка прогноза — 1,7 %.

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы.

1. Построенная блочная геолого-технологическая модель позволяет оптимизировать процесс переработки руды путем усреднения не только по содержанию, но и по предполагаемому извлечению металла.

2. С помощью БГТМ возможны поблочный учет и прогнозирование эксплуатационных издержек при переработке руд, а следовательно, выручки и прибыли добывающего предприятия.

3. Следует обратить внимание на то, что в результате блочного геолого-технологического моделирования может измениться контур рудных тел, поскольку часть некондиционных по содержанию, но легкообогатимых по свойствам руд может характеризоваться экономическими показателями, сопоставимыми с балансовыми рудами.

Список литературы

1. Изойтко В. М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997.
2. Ревнивцев В. И. Роль технологической минералогии в обогащении полезных ископаемых // Зап. ВМО. 1982. Вып. 4.
3. Типоморфные свойства и технологические особенности молибденитов / В. М. Изойтко, С. В. Петров, Е. П. Пшеничникова, А. В. Щукарев // Зап. ВМО. 1997. Вып. 2.
4. Букринский В. А. Геометрия недр. М.: Недра, 1985.
5. Blacwell G. H., Johnston T. G. Deposit modeling to mine production in an open pit copper-molybdenum mine. 1986.
6. Leuangthong O., Clayton V. Deutsch, Quantitative Geology and Geostatistics. Springer, 2005.
7. Goovaerts P. Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford University Press, 1997.

THE PRINCIPLES OF BUILDING A BLOCK GEOLOGICAL-AND-PROCESSING MODEL OF MINERAL DEPOSIT
S. V. PETROV, P. M. MISHULOVICH, V. V. SMOLENSKY

Building of a block geological-and-processing model of molybdenum deposit is shown. Block model of ores typification with respect to processing properties is calculated with application of indicator kriging. Parameter of molybdenum recovery into concentrate was determined by ore types recovery relationship curves with regard to each block of the model.

Key words: geological-and-processing mapping, block modeling, processing properties.