

УДК 622.34(001)

**Ф.М.Федоров, А.И.Матвеев, В.Р.Ларионов,
Л.Н.Горохова**

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ПОРЯДКА РАЗДЕЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ РАЗНОКАЧЕСТВЕННЫХ УЧАСТКОВ МЕЛКИХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Предложена раздельная разработка мелких рудных месторождений с использованием передвижных модульных установок. Разработана методика технико-экономической оценки отработки мелких месторождений рудных тел на основе модели линейного программирования.

Ключевые слова: раздельная разработка, мелкие рудные месторождения, технико-экономическая оценка, методика, модели, линейное программирование, затраты.

Как отмечается в работе [1], многие рудные месторождения, в их числе месторождения полиметаллов, олова, ртути, сурьмы, урана и других металлов, имеют весьма неравномерное распределение полезных компонентов, как в пределах залежей (гнезд), так и в рудовмещающих породах. На некоторых из этих месторождений разработка ведется селективным способом, что требует проходки огромного числа разведочно-эксплуатационных и подготовительно-нарезных выработок с целью более детальной разведки и подготовки рудных тел (гнезд). Последующая выемка этих рудных гнезд ведется малопроизводительными системами.

В ряде работ [2-7], в частности и в [1], указывается, что при селективной выемке обеспечивается более высокое качество руды, а иногда и снижение себестоимости металла. Однако такая отработка ограничивает масштабы производства, ведет к быстрому истощению запасов недр, увеличению потерь металла и сокращению срока существования рудника. Те-

ряемые при этом запасы металлов в виде мелких гнезд и маломощных рудных прослоек достигают 30-40% всех запасов рудного поля.

Валовая выемка руды на таких месторождениях позволяет увеличить объем добычи руды, вследствие расширения фронта работ, повысить их безопасность и снизить затраты на добычу. Недостаток валовой выемки - снижение извлекаемой ценности добываемой рудной массы [1].

Но, в практике горных работ довольно часты случаи, когда возникают задачи о вовлечении в разработку или оставлении в недрах отдельных участков месторождения [1, 4]. Причины появления таких задач могут быть самые различные, но наиболее часто они возникают в результате выборочной отработки и вследствие осложнения горно-геологических условий [4]. Как далее отмечают авторы работы [4], подобная выборочная отработка не имеет ничего общего с встречающейся в практике первоочередной отработки отдельных богатых зон или участков месторождения, которая не

только в максимальной степени способствует удовлетворению потребностей народного хозяйства в минеральном сырье, но и обеспечивает наиболее полное использование всех балансовых запасов месторождения. В этом направлении уже давно успешно ведутся научные изыскания, так, например, в работах [8-11] путем сравнения нескольких вариантов технико-экономических показателей обоснуется порядок отработки разнокачественных запасов. И в частности, авторы пришли к выводу, что в реальных горно-геологических условиях месторождений, когда без ущерба для полноты выемки запасов можно отработать их дифференцированно, в проекте следует предусматривать приоритетную выемку богатых запасов с последующим переходом на руды среднего качества и включением бедных на последующем этапе разработки.

Тем не менее, задачи освоения небольших рудных месторождений и рудопроявлений полезных ископаемых, в частности, золота, несомненно, соответствуют концепции отдельной разработки месторождений [12, 13] и концепции модульного принципа конструирования аппаратов и построения технологических схем обогащения [12, 14, 15]. Уместно заметить, что данные концепции разработаны именно для полного устранения или существенного сокращения указанных недостатков селективной или валовой выемки разнокачественных участков сложных месторождений, к таковым, несомненно, относятся и малые месторождения, например, тонкожилые.

Суть концепций модульного принципа и отдельной разработки месторождений минерального сырья, выдвинутые в работах [12-15], представляет собой в кратком изложении следующее.

Термин отдельной разработки месторождений вмещает более общее понятие, включающее в себя весь комплекс этапов разработки, начиная с разведки и кончая получением кондиционных товарных концентратов полезных компонентов (вплоть до получения лигатурного металла). И, по сути, отдельная разработка месторождения может означать целостную концепцию (разведка, добыча, обогащение) с максимальным использованием особенностей природной разобщенности распределения полезных компонентов в недрах, изменчивости технологических свойств, учитываемых на всех стадиях технологической переработки.

Не останавливаясь подробно на стадии геологоразведки, отметим лишь то, что на конечном этапе разведки проводится геотехнологическое (поблочное) оконтуривание месторождения, определяются и уточняются запасы по ним. Геометризация месторождения по технологическим типам предполагает установление определенной связи процессов для подготовки и обогащения минерального сырья с учетом увязки генетической и обогатительной классификации месторождений. При этом уже на стадии геологоразведки определяется принципиальная технологическая схема переработки для отдельно взятого участка или блока месторождения.

На стадии добычи руд техника, а также технология функционально подчиняются к задаче селективной выемки оконтуренных блоков. При этом главной задачей применяемой техники и технологии является максимальное сокращение объемов разубоживания, качественное кондиционирование отдельных порций руды методами предобогащения и усреднения в соответствии с параметрами

соответствующих технологических сортов. При ведении горных работ, таким образом, исключается процесс валового усреднения под одну базовую технологию (стационарная обогатительная фабрика), а руда подготавливается к процессам переработки и обогащения в соответствии с установленными сортами и кондиционируется в соответствии с требованиями к отдельно взятому сорту.

При малообъемной технологии задача переработки обогащения разнокачественного сырья является сложной проблемой, так как проведение усреднительных мероприятий в условиях малообъемной технологии практически нереально с одной стороны, и практически невозможно организовать универсальную технологию для переработки разнокачественной руды в рамках производительности 2-6 т/ч с другой стороны.

С учетом стадийности и циклического характера технологических схем обогащения становится возможным применение принципа модульного проектирования технологических схем переработки и обогащения руд в условиях малообъемного производства, согласно которым руда последовательно подвергается обработке в технологических модулях.

Под технологическим модулем можно понимать определенную локальную совокупность операций и процессов обогащения, объединенных для выполнения определенной стадии обработки руды до получения кондиционной конечной товарной продукции. Наиболее важным признаком технологического модуля обогащения в условиях малообъемного производства является ее полная технологическая самостоятельность (автономность), а с учетом физических объемов переработки руды и территориальной разбросанности мелких

месторождений и рудопроявлений - мобильность.

Таким образом, отдельная разработка месторождений минерального сырья в нашем понимании (в сочетании с модульными принципами, в частности, с использованием мобильных модульных установок) существенно отличается от выборочной (селективной) отработки тем, что она является на самом деле валовой разработкой без применения валовых усреднительных процессов. В отличие от классической валовой отработки в ней отсутствуют транспортные расходы в больших масштабах, кроме того, возникает дополнительная возможность оптимизации по экономическим критериям в зависимости от порядка отработки разнокачественных участков месторождения.

Как уже выше упомянуто, возможность оптимизации порядка отработки разнокачественных участков месторождения частично была рассмотрена в работах [8-11], а задача в более полной постановке приведена и решена нами в работах [12, 16]. Кратко изложим суть вопроса в полной постановке. Пусть существует n разнокачественных по критериям разделения, классифицированных по содержанию металла, по крепости дробления, по критериям разубоживания, по физико-химическим свойствам и т. д., участков месторождения. Сумма объемов этих участков составляет весь объем данного месторождения. Как указано в работах [12, 16], для каждого участка i ($i=1,2,\dots,n$), вычисляем его ценность в зависимости от порядка отработки j ($j=1,2,\dots,n$) по наиболее общей формуле:

$$C_{i,j} = A_{i,j} (B_{i,j} \varepsilon_{i,j} - Z_{i,j}), \quad (1)$$

где $A_{i,j}$ может быть пропорциональна производительности участка по руде, времени отработки участка и функ-

ции от дисконтирования, $V_{i,j}$ - пропорционален цене металла, среднему содержанию металла и, возможно, в зависимости от порядка отработки участка, $Z_{i,j}$ - пропорционален затратам отработки участка.

В зависимости от экономической модели выражение (1) может быть конкретизировано [7, 8, 10]. Например, в работе [8] формула (1) имеет вид:

$$\Pi_{i,j} = A_{i,j} T_{i,j}(A_i, A_j) (0,01 a_i \varepsilon_{i,j} \Pi - Z_{i,j}(A_i, A_j)), \quad (2)$$

где A_i - производительность участка по руде, т/год; $T_{i,j}(A_i, A_j)$ - продолжительность отработки i -го участка на j -ом этапе, лет; $\varepsilon_{i,j}$, $Z_{i,j}$ - извлечение металла из руды и затраты на ее добычу и переработки по i -му участку на j -ом этапе отработки месторождения; a_i - качество запасов участка; Π - цена металла, руб/т.

Далее введем квадратную матрицу $\{x_{i,j}\}$ порядка n , причем элемент $x_{i,j}$ равен 1 или 0, в соответствии с тем, что i -й участок обрабатывается или нет в j -ом порядке. Тогда, по допущенному предположению, существуют следующие ограничения:

$$\sum_{i=1}^n x_{i,j} = 1, \quad j=1, \dots, n; \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{i,j} = 1, \quad i=1, \dots, n. \quad (4)$$

Подчеркнем, что условия (3), (4) говорят о том, что в матрице $\{x_{i,j}\}$ в каждой строке только один элемент равен 1, а остальные равны 0, кроме того, в каждом столбце только один элемент равен 1, а остальные равны 0. Задача наша состоит в том, чтобы

функционал ценности F месторождения максимизировать:

$$F = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \Pi_{i,j} x_{i,j} \rightarrow \max. \quad (5)$$

Таким образом, задача определения оптимального порядка сведена к транспортной задаче [12, 16].

Теперь можно рассмотреть следующие возможные ситуации:

1) ценность каждого разнокачественного участка месторождения полезных ископаемых может зависеть, и от порядка отработки, и от взаимного расположения отработанных и не отработанных участков;

2) ценность каждого участка зависит только от порядка отработки участков.

Как уже указано выше, вторая ситуация рассмотрена в работах авторов [12, 16]. Отметим лишь, что для решения транспортной задачи существуют различные методы ее решения: как решение задачи линейного программирования применяется симплекс метод, а как решение собственно транспортной задачи используются метод потенциалов, метод дифференциальной ренты и распределения. Но, к сожалению, все эти методы

не могут быть применены для решения первой ситуации. Поэтому рассмотрим еще один подход. Поскольку наша задача является частным случаем транспортной задачи, точнее матрица стоимости (в нашем случае ценности) является квадратной и одна клетка этой матрицы участвует только по одному разу в столбце (3) и строке (4) при одной комбинации, то реально возможен, при сравнительно малом порядке матрицы, метод полного перебора. Поступаем аналогично вычислению определителя заданной матрицы $\{a_{i,j}\}$, в нашем случае матрицы ценности $\{\Pi_{i,j}\}$, но вместо произ-

ведения $a_{1,j_1} a_{2,j_2} \dots a_{n,j_n}$ берем сумму $F_k = a_{1,j_1} + a_{2,j_2} + \dots + a_{n,j_n}$, где j_1, j_2, \dots, j_n - перестановка чисел $1, 2, \dots, n$, k - произвольная нумерация перестановок. Задача наша состоит в определении максимума из множества $\{F_k\}$, которого, естественно, можно найти методом перебора. Составление программы расчета по данному подходу на современных ПК не составляет труда для опытных программистов.

Заметим, что вместо матрицы ценности $\{C_{i,j}\}$ можно взять матрицу массы извлекаемого металла $\{M_{i,j}\}$, где $M_{i,j} = 0,01A_i T_{i,j} a_i \varepsilon_{i,j}$ [8].

Для разъяснения первой ситуации можно рассмотреть (с целью существенного сокращения вариантов расчета) только три основных расположения отработанных или не отработанных соседей данного участка:

- хотя рассматриваемый участок обрабатывается не первым, затраты на его обработку такие же как, если бы он обрабатывался первым, т. е. ни один из соседей еще не отработан;

- отработан один (два, три и т. д.) соседний участок при условии, что имеются еще не отработанные соседние участки;

- все соседние участки отработаны, т. е. данный участок обрабатывается как целик.

Естественно, приведенное здесь взаимное расположение разнокачественных участков является весьма условным, более реальную технологию на основе сочетания различных методов раздельной выемки качественных сортов руд с последующей их раздельной переработкой можно найти, например, в работе [11].

Для иллюстрации возможного влияния на затрату при добыче рассматриваемого участка взаимного

расположения отработанных и не отработанных соседних участков в зависимости от порядка отработки рассмотрим следующий пример. При этом для простоты изложения возьмем три участка, расположенных последовательно в один ряд, т. е. соседними участками могут быть только слева и справа. Схему расположения участков и порядок отработки можно представить в таком виде:

1	2	3
---	---	---

 – нумерация участков, т. е. порядок их расположения;

I

 – участок обрабатывается первым;

II

 – участок обрабатывается вторым;

III

 – участок обрабатывается третьим.

В случае трех участков всевозможные варианты ($3!=6$) расположения отработанных и не отработанных участков в некоторый момент времени и порядок отработки представляются следующим образом:

1)

I	II	III
---	----	-----

 – первый участок обрабатывается первым, второй - вторым, третий - третьим, т. е. порядок отработки по участкам ij : 11; 22; 33 - первый порядок, а функционал ценности всего месторождения, состоящего из трех участков имеет вид

$$F_1 = C_{11} + C_{22} + C_{33};$$

2)

I	III	II
---	-----	----

 – первый - первым, второй - третьим, третий - вторым, т. е. порядок отработки ij : 11; 23; 32 - второй порядок, функционал ценности - $F_2 = C_{11} + C_{23} + C_{32}$;

3)

II	I	III
----	---	-----

 – первый - вторым, второй - первым, третий - третьим, т. е. порядок отработки ij : 12; 21; 33 - третий порядок, функционал ценности - $F_3 = C_{12} + C_{21} + C_{33}$;

4) $\boxed{\text{Ш}} \boxed{\text{I}} \boxed{\text{II}}$ – первый - третьим, второй - первым, третий - вторым, т. е. порядок обработки ij: 13; 21; 32 - четвертый порядок, функционал ценности - $F_4 = \Pi_{13} + \Pi_{21} + \Pi_{32}$;

5) $\boxed{\text{I}} \boxed{\text{Ш}} \boxed{\text{I}}$ – первый - вторым, второй - третьим, третий - первым, т. е. порядок обработки ij: 12; 23; 31 - пятый порядок, функционал ценности - $F_5 = \Pi_{12} + \Pi_{23} + \Pi_{31}$;

6) $\boxed{\text{Ш}} \boxed{\text{II}} \boxed{\text{I}}$ – первый - третьим, второй - вторым, третий - первым, т. е. порядок обработки ij: 13; 22; 31 - шестой порядок, функционал ценности - $F_6 = \Pi_{13} + \Pi_{22} + \Pi_{31}$.

Тогда максимальная ценность месторождения имеет вид $F = \max_i F_i$. Заметим, что в таком подходе ценность индивидуального участка $\Pi_{i,j}$ может иметь произвольное значение, в частности, нулевое и даже отрицательное (забалансовое). Случай нулевого значения означает, что данный участок в данном порядке как бы не обрабатывается.

На основании вариантов (порядков обработки) 1) - 6) сделаем анализ возможного влияния на затрату при разработке рассматриваемого участка обработки или не обработки соседних участков в зависимости от порядка обработки. Прежде всего заметим, что, очевидно, на затраты при разработке любого участка первым не влияет порядок обработки соседних участков. Рассмотрение начнем по порядку обработки, начиная с первого варианта-порядка. Поскольку первый участок разрабатывается первым, то в силу вышесказанного, для этого порядка обработки достаточно рассмотреть второй и третий участки. Второй участок обрабатывается вторым, также он обрабатывается вторым в шестом порядке (см. шестой вариант) обработки, причем данный

участок вторым больше не участвует ни в какой комбинации. В обоих случаях, один соседний участок обработан, а другой - еще не обработан, поэтому можно считать, что затраты на обработку данного участка одинаковы в обоих вариантах порядка обработки. Третий участок третьим обрабатывается еще и в третьем варианте обработки. Также в обоих случаях затраты одинаковы. Переходим ко второму варианту обработки. Аналогичным образом убеждаемся, что затраты на разработку второго участка идентичны в вариантах 2) и 5). Что касается третьего участка, то он разрабатывается вторым, причем соседние участки еще не обработаны, а в четвертом порядке (см. вариант 4), где данный участок также разрабатывается вторым, соседний участок справа уже обработан, следовательно, затраты на разработку этого участка в указанных порядках обработки могут быть различными и поэтому

$$F_4 = \Pi_{13} + \Pi_{21} + \bar{\Pi}_{32} \quad (\Pi_{32} \neq \bar{\Pi}_{32}) .$$

Подобными рассуждениями можно убедиться, что имеется еще только одна пара порядков, когда затраты на разработку данного участка различаются в зависимости от порядка обработки, а именно варианты 3) и 5), где первый участок обрабатывается вторым, тогда

$$F_5 = \bar{\Pi}_{12} + \Pi_{23} + \Pi_{31} \quad (\Pi_{12} \neq \bar{\Pi}_{12}) .$$

Таким образом, в данном случае максимальная ценность месторождения будет определяться не из вариантов 1)-6), а из следующего сочетания:

$$F_1 = \Pi_{11} + \Pi_{22} + \Pi_{33} ;$$

$$F_2 = \Pi_{11} + \Pi_{23} + \Pi_{32} ;$$

$$F_3 = \Pi_{12} + \Pi_{21} + \Pi_{33} ;$$

$$F_4 = \Pi_{13} + \Pi_{21} + \bar{\Pi}_{32} ;$$

$$F_5 = \bar{\Pi}_{12} + \Pi_{23} + \Pi_{31} ;$$

$$F_6 = \Pi_{13} + \Pi_{22} + \Pi_{31} .$$

Отсюда ясно видна неприменимость классических методов оптимизации задач линейного программирования. Вместе с тем эту задачу можно свести к решению классических транспортных задач, но не одной, а нескольких, например, в данном случае можно взять 2 матрицы ценности, где вторая матрица отличается от первой элементами только в клетках 21 и 32.

Как отмечено в работе [1], кроме всего прочего, задачи сравнения раздельной и валовой выемки и переработки приходится решать в случаях, когда:

а) совместно с богатыми рудами в пределах одной залежи находятся бедные руды того же сорта, а также породные прослойки и включения;

б) при разработке жильных месторождений приходится прихватывать забалансовые руды и пустые вмещающие породы;

в) в пределах одной рудной залежи имеются включения и прослойки руд разных сортов;

г) руды разных сортов одного и того же месторождения находятся в разных рудных залежах.

Во всех этих случаях данное мелкое месторождение следует разделить на соответствующие разнокачественные по геометрии, по содержанию

полезного компонента и т. д. участки с детализацией геоинформации при предположении наличия или возможной разработки соответствующих модульных установок и аппаратов добычи и переработки руды.

С учетом объема производства, использования производственных фондов, полноты извлечения полезных ископаемых при добыче и переработке (см. формулу (1)) можно сделать по предложенной методике полную экономическую оценку разработки всего месторождения с включением или без включения забалансовых участков.

Как отмечено в работе [17], "число новых способов снижения потерь и разубоживания полезных ископаемых при добыче весьма невелико и далеко не исчерпывает имеющиеся возможности. Для разработки новых эффективных способов снижения потерь и разубоживания полезных ископаемых при добыче на горных предприятиях целесообразно усилить и расширить масштабы научно-исследовательских работ в этом направлении".

В этом плане, безусловно, предлагаемый подход разработки мелких месторождений рудных тел позволяет наиболее рационально использовать недровые богатства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шестаков В.А. Рациональное использование недр. – М.: Недра, 1976.

2. Шестаков В.А., Яковлев М.А., Дронов Н.В. и др. Оценка ущерба от потерь и разубоживания руды и установление их допустимого уровня. – Фрунзе: "Илим", 1970.

3. Шестаков В.А. Научные основы выбора и экономической оценки систем разработки рудных месторождений. – М.: Недра, 1976.

4. Агошков М.И., Никаноров В.И., Панфилов Е.И. и др. Техничко-экономи-

ческая оценка извлечения полезных ископаемых из недр. – М.: Недра, 1974.

5. Ермолин Ю.Н. Экономическое обоснование селективной отбойки руды при разработке полиметаллических месторождений сложного строения открытым способом // Изв. вузов. – Горный журнал. – 1964. – №1.

6. Боголюбов Б.П., Грачев Ф.Г. Раздельная разработка месторождений сложного состава. – М.: Недра, 1964.

7. Литовченко Т.В. Техничко-экономическое обоснование оптимальных рудопото-

ков и технологии подземной добычи многокомпонентных и разнородных руд: автореф. дис. канд. техн. наук [ЮРГТУ]. – Ново-черкасск: 1999.

8. *Серебрянский А.Т.* Обоснования порядка отработки разнокачественных запасов // Комплексное освоение рудных месторождений. – Бишкек: Илим, 1991.

9. *Толобекова Б.Т.* Сравнительный анализ результатов оптимизации горно-экономических параметров рудников в динамической и статической постановках // Комплексное освоение рудных месторождений. – Бишкек: Илим, 1991.

10. *Толобекова Б.Т.* Влияние фактора времени на результаты оптимизации горно-экономических параметров рудников. // Горно-экономическое обоснование рациональных методов подземной разработки рудных месторождений. – Бишкек: Илим, 1991.

11. *Жуков Н.А.* Раздельная добыча и переработка литологических типов и качественных сортов ртутных руд. // Горно-экономическое обоснование рациональных методов подземной разработки рудных месторождений. – Бишкек: Илим, 1991.

12. *Матвеев А.И., Федоров Ф.М., Ларионов В.Р.* Раздельная разработка месторождений минерального сырья с использованием передвижных модульных обогатительных установок. – Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2002.

13. *Матвеев А.И., Федоров Ф.М., Ларионов В.Р.* Концепция раздельной разработки минерального сырья: Разведка, добыча, обогащение // «Драгоценные металлы и камни - проблемы добычи и извлечения из руд, песков и вторичного сырья»: материалы Международной научно-практической конференции и выставки. – Иркутск: Ирригредмет, 2001.

14. *Матвеев А.И., Федоров Ф.М.* Модульный принцип построения технологических схем обогащения при малообъемной переработке руд с использованием передвижных модульных установок // «Научные основы и практика разведки и переработки руд и техногенного сырья»: материалы Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург: Издательство АМБ, 2003.

15. *Матвеев А.И.* Технологии сухого обогащения руд малых коренных месторождений и рудопоявлений золота на основе модульных передвижных установок: автореф. дис. докт. техн. наук [ИПКОН]. – М., 2004.

16. *Федоров Ф.М., Матвеев А.И., Ларионов В.Р., Федоров В.Ф.* Рациональная разработка разнокачественных участков месторождений минерального сырья // Математические заметки ЯГУ. – Новосибирск, 2001. – Т. 8, вып. 2.

17. *Зарайский В.Н., Стрельцов В.И.* Рациональное использование и охрана недр на горно-добывающих предприятиях. – М.: Недра, 1987. **ПЛАТ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Федоров Фома Михайлович - доктор физико-математических наук, ст. научный сотрудник, Научно-исследовательский институт математики им. А.И.Кузьмина при СВФУ,

Матвеев Андрей Иннокентьевич - доктор технических наук, ст. научный сотрудник,
Ларионов Владимир Романович – кандидат химических наук, ст. научный сотрудник,
Горохова Лия Николаевна - ведущий инженер.

Учреждение Российской Академии наук Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН, Якутск, a.i.matveev@igds.ysn.ru

