

УДК 622.693

**З.Р. Гибадуллин, В.Н. Калмыков, А.Н. Рахмангулов,
О.В. Петрова**

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ВЫБОРА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ
РУДНОЙ МАССЫ ПРИ ОСВОЕНИИ ЗАПАСОВ
ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН**

Разработана экономико-математическая модель транспортирования рудной массы при отработке запасов переходных зон, представлены результаты апробации разработанной модели для условий транспортирования прибортовых и придонных запасов при комбинированной разработке медно-колчеданных месторождений.

Ключевые слова: технологические схемы транспортирования; экономико-математическое моделирование, прибортовые и придонные запасы, линейное программирование.

При освоении крутопадающих медно-колчеданных месторождений комбинированным способом за предельными контурами карьеров остаются запасы, эффективная доработка которых, как правило, осуществляется открыто-подземным и подземным способами. При этом большая часть подкарьерных запасов (60—65 %) располагается ниже дна карьера, 15—20 % — в бортах карьера и до 25 % — в удаленных от карьера, отдельно расположенных залежах или участках месторождения. При освоении подкарьерных запасов подземным способом для выдачи рудной массы на поверхность используются транспортные средства и выработки карьеров и подземных рудников. Завершающий в общем цикле горных работ процесс перемещения добытой руды от места ее отбойки до рудного склада характеризуется высоким уровнем трудоемкости, эксплуатационных затрат (затраты достигают более 50 % от

общих) и, как следствие, во многом предопределяет конечные показатели работы рудника [1].

Подкарьерные запасы характеризуются сложностью залегания, разбросанностью в пространстве, значительным разбросом по объемам, сортам и содержанию полезных компонентов, широким диапазоном удаленности залежей от предельного контура карьера и вскрывающих выработок рудника. Схемы транспортирования рудной массы на обогатительную фабрику отличаются многовариантностью и изменчивостью вследствие разнообразия используемых транспортных средств и рудовыдачных выработок и их адаптации к сложным горнотехническим условиям разработки подкарьерных запасов [2].

Исходя из анализа опыта и научно-методических подходов к выбору схемы перемещения рудной массы в период освоения переходных зон следует отметить отсутствие единого научно-методического подхода. Мно-

гообразии транспортных схем, применяемых в настоящее время при транспортировании рудной массы на поверхность, их трансформация во времени, ужесточение требований по обеспечению объема производства с требуемым качеством обуславливает множество возможных вариантов технологических схем перемещения рудной массы с различными стоимостными показателями транспортирования.

Для определения области рационального применения различных технологических схем перемещения руды разработана методика экономико-математического моделирования процессов транспортирования рудной массы при освоении переходных зон.

Задача определения оптимальной технологической схемы перемещения рудной массы на поверхность при отработке запасов в переходной зоне формулируется следующим образом. Имеются запасы полезного ископаемого, которые обрабатываются на нескольких участках в прибортовой и придонной частях карьера. Известны:

- возможная годовая производительность каждого участка по объему добычи рудной массы, подлежащей выдаче на поверхность непосредственно или с перегрузкой;
- качественные характеристики рудной массы;
- затраты на перемещение рудной массы от каждого участка до поверхностного склада руды, а также между участками;
- затраты на перегрузку (перевалку) горной массы на каждом участке, а также на её выгрузку на поверхностном складе руды;
- требуемый объем добычи рудной массы (годовая производительность);
- требуемое качество рудной массы (процентное содержание полезного ископаемого).

Требуется сформировать оптимальную схему перемещения рудной массы с участков, обеспечивающую заданные объем и качество рудной массы, при минимуме суммарных затрат на добычу, транспортировку и перегрузку (выгрузку) рудной массы.

В такой постановке данная оптимизационная задача представляет собой сочетание двух задач линейного программирования, известных как «задача об оптимальном составе смеси» (распределительная задача) и «статическая транспортная задача в сетевой постановке». Новизну составляет разработанная математическая модель и методика решения задачи об оптимальном составе суммарного потока в вершину транспортной сети с единственным стоком.

Возможные варианты отработки запасов на конечном множестве участков предлагается описывать в общем случае неплоским полным неориентированным графом. Такое представление обусловлено тем, что каждая пара добычных участков может быть связана транспортными коммуникациями, и с каждого добычного участка рудная масса может доставляться непосредственно до поверхностного склада руды.

Подобный граф в терминах выбранного метода решения будем называть транспортной сетью. Транспортная сеть представляет собой конечное множество элементов двух типов:

- вершины $i = 1, 2, \dots, N$ транспортной сети, где i — номер вершины, N — число вершин. Каждой вершине i приписана величина избытка потока Q_i . При положительном значении Q_i вершина является поставщиком потока. Вершины, соответствующие добычным участкам, имеют положительные вели-

чины Q_i , определяющие их возможную годовую производительность. Вершина, соответствующая поверхностному складу руды, обладает отрицательной величиной Q_i , определяющей потребную годовую производственную мощность горного предприятия. Вершины с нулевой величиной избытка потока (транзитные вершины) по условию решаемой задачи отсутствуют;

- дуги i, j транспортной сети, где i — номер начальной вершины дуги, j — номер конечной вершины. Начало и конец дуги определяются направлением движения потока величиной q_{ij} по дуге. Каждая дуга транспортной сети характеризуется потенциалом p_{ij} . Потенциал дуги i, j в рамках решаемой задачи рассчитывается по формуле

$$p_{ij} = C_{ij} + C_j, \quad (1)$$

где C_{ij} — затраты на перемещение горной массы по дуге i, j ; C_j — затраты на перегрузку (выгрузку — для поверхностного склада руды) горной массы в вершине j .

В общем случае каждая дуга i, j транспортной сети обладает двумя потенциалами: потенциал p_{ij} соответствует затратам при движении потока от вершины i к вершине j ; потенциал p_{ji} соответствует затратам при движении потока в обратном направлении — от вершины j к вершине i .

На транспортной сети существуют пути (маршруты) S_{ij} между любыми двумя вершинами ij . S_{ij} представляет собой последовательности дуг i, j_1 ; j_1, j_2 ; j_2, j_3 ; ...; j_l, j . Тогда каждая вершина i , принадлежащая дуге мар-

шрута, будет обладать потенциалом p_i , равным сумме потенциалов дуг от начальной вершины маршрута до i -й.

Математическая модель задачи об оптимальном составе потока рудной массы с учетом введенных понятий представляется в виде целевой функции, минимизирующей суммарные для N -го количества участков затраты на отработку запасов, транспортировку горной массы до поверхностного склада руд и перегрузку (перевалку) потока рудной массы в процессе транспортировки

$$F = \sum_{i=1}^N q_i p_i \rightarrow \min, \quad (2)$$

где q_i — фактическая величина избытка потока в i -й вершине (фактическая производительность участка), определяется из соотношения

$$q_i = Q_i - q_i^0, \text{ для } i = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

где q_i^0 — неиспользованная производительность i -го участка.

На целевую функцию (2) накладываются ограничения на обеспечение заданного объема добычи горным предприятием, а также условие добычи рудной массы заданного качества (состава). Ограничение на совмещенную производительность участков

$$\sum_{i=1}^N q_i = Q, \quad (4)$$

где Q — избыток потока в вершине, соответствующей поверхностному складу руды — суммарный поток в эту вершину (заданная годовая мощность рудника).

Условие обеспечения добычи рудной массы определенного качественного состава может быть записано как равенство средневзвешенной величины процентного содержания k -го полезного ископаемого в запасах всех

участков и требуемого содержания k -го полезного ископаемого в рудной массе на складе:

$$\sum_{i=1}^N (a_{ik} q_i) / \sum_{i=1}^N q_i = a_k, \quad \text{для } k = 1, 2, 3, \dots, R, \quad (5)$$

где a_{ik} — процентное содержание k -го полезного ископаемого в запасах i -го участка; R — число видов полезных компонентов в добываемой рудной массе. В частном случае в рудной массе присутствует один вид полезного компонента, т.е. $R=1$; a_k — требуемое процентное содержание k -го полезного компонента в общем объеме добываемой рудной массы.

Если обработка нескольких камер производится одновременно в пределах одного горизонта, то в модель вводится дополнительное ограничение на добычу только из одной из этой группы камер.

$$\delta_i + \delta_j = 1, \text{ для } i, j \in N_0, \quad (6)$$

где δ_i, δ_j — вспомогательные переменные, принимающие значение 0 или 1; N_0 — множество камер в пределах одного горизонта.

Тогда целевая функция модели (3.2) запишется как

$$F = \sum_{i=1}^N q_i p_i \delta_i \rightarrow \min. \quad (7)$$

Выражения (3) — (7) в совокупности образуют математическую модель, решением которой является оптимальный по критерию минимума суммарных затрат план распределения объемов добычи рудной массы между участками.

Для достижения минимума целевой функции (2) необходимо определить оптимальные (минимальные) значения оценок вершин транспортной сети p_i . Это обеспечивается по-

строением системы оптимальных (кратчайших) маршрутов, соединяющих каждую вершину транспортной сети с положительной величиной избытка потока со стоком транспортной сети — вершиной с отрицательным избытком потока.

Поскольку в рассматриваемой задаче на транспортной сети присутствует один сток (поверхностный склад руды), то существует единственный вариант системы оптимальных маршрутов. Для его нахождения достаточно определить потенциалы каждой вершины транспортной сети из решения следующей задачи линейного программирования [3]

$$\sum_{i=1}^N p_i \rightarrow \max, \quad (8)$$

при условиях:

$$p_j - p_i \leq p_{ij}, \text{ для всех дуг } i, j; \quad (9)$$

$$p_i \leq M \text{ для } i = 1, 2, \dots, N; \quad (10)$$

$$p_1 = 0, \quad (11)$$

где M — максимально большое положительное число; p_1 — потенциал начальной вершины системы маршрутов. По условиям данной задачи существует единственная начальная вершина-сток, которой условно присваивается номер (индекс) 1.

Методика решения задачи определения оптимальной схемы транспортирования рудной массы при обработке подкарьерных запасов представляет совокупность двух линейных оптимизационных моделей (1)—(5) и (6)—(9), включает в себя следующие действия:

1. Составление схемы транспортной сети, описывающей транспортные связи между участками, а также между участками и поверхностным складом руды;

2. Расчет потенциалов дуг транспортной сети по формуле (1);

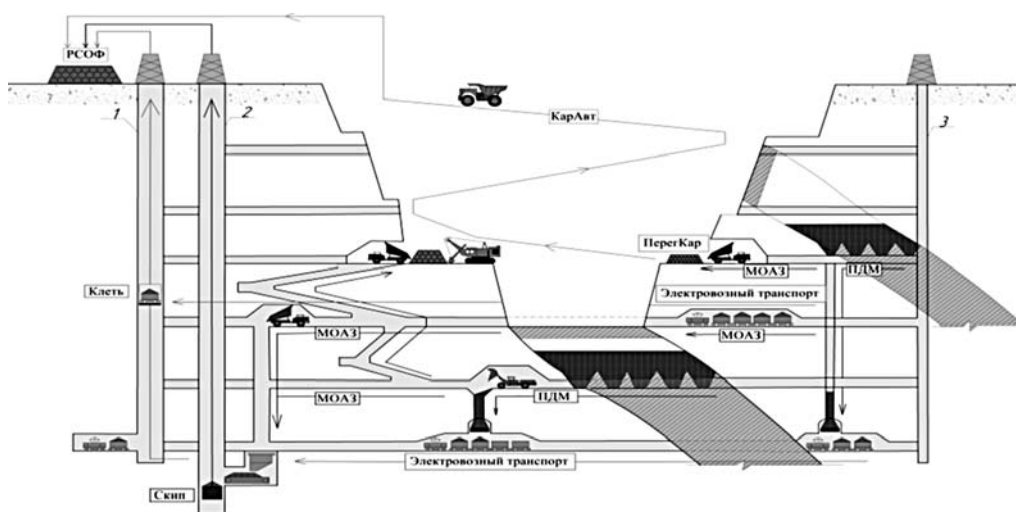


Рис. 1. Базовая технологическая схема транспортирования рудной массы при освоении подкарьерных запасов через карьер и подземные выработки: 1 — клетевой ствол; 2 — скиповой ствол; 3 — вентиляционный ствол; 4 — капитальная траншея

3. Определение исходных данных модели: Q , Q_i , a_{jk} , a_k ;

4. Решение модели (8)–(11) и построение системы оптимальных маршрутов. Для этого может быть использована каноническая форма представления этой модели с последующим её решением стандартным симплексным методом. Более эффективным вычислительным методом является метод построения «таблицы оптимальных путей» [4], основанный на сетевой постановке модели (8)–(11). Для автоматизации этого метода использована программа построения таблицы оптимальных путей [5];

5. Рассчитанные на предыдущем этапе оптимальные значения p_i подставляются в целевую функцию (1). Далее модель (3)–(7) решается стандартным симплексным методом.

Апробация разработанной модели производилась для следующих условий транспортирования рудной массы при отработке прибортовых запасов. В качестве базового карьера при технологическом моделировании принята от-

крытая горная выработка глубиной 300 м, с углами откосов борта карьера 40° , вытянутая по форме в плане, размер по верху — 2 км (рис. 1). В карьере имеется капитальная траншея, пройденная под углом 6° , обеспечивающая движение большегрузных карьерных автосамосвалов. Шахтные стволы и откаточные горизонты построены к моменту завершения открытых работ и оборудованы средствами откатки и подъема. Объем добычи из переходной зоны, исходя из опыта эксплуатации медно-колчеданных месторождений, изменяется от 15 до 35 % производственной мощности рудника, в расчетах принят равным 400 тыс.т. в год. Содержание полезных компонентов в дорабатываемых участках изменяется от 1 до 3,5 %. Требование стабилизации качества рудной массы распространено на весь объем добытой руды приконтурной зоны.

При моделировании вариантов развития базовой технологической схемы транспортирования рудной массы приняты следующие средства механизации: погрузочно-доставочные машины (ПДМ),

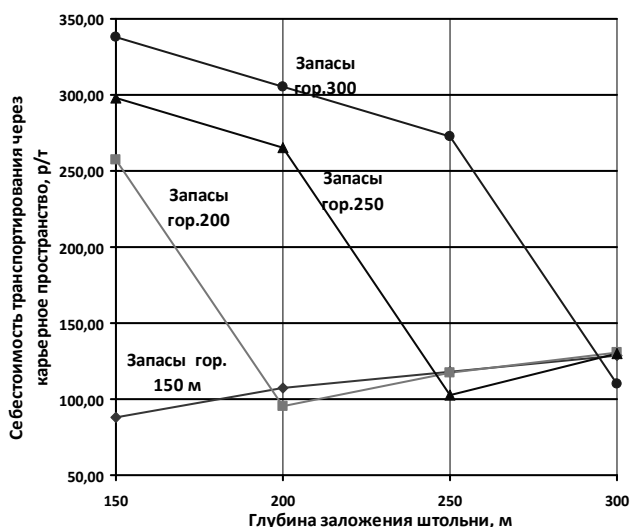


Рис. 2. Зависимость себестоимости транспортирования рудной массы с использованием карьерного пространства от глубины заложения штольни

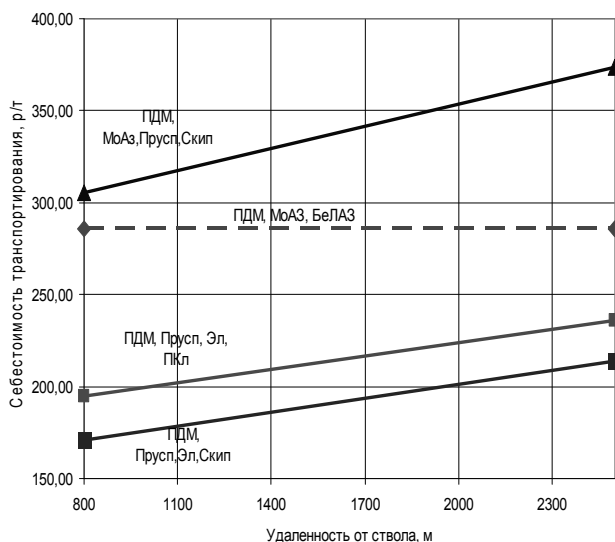


Рис. 3. Зависимости себестоимости перемещения 1т придонных запасов гор.380 м от длины откатки (при высоте скипового подъема 500 м)

автосамосвалы карьерные (КарАвт) и подземные (МОАЗ), электровозный рельсовый транспорт, клетевой и скиповой подъемы; выработки для капитальных

рудоспусков, питатели для бункеров, оборудованные вибролюками, а также экскаваторы, ковшовые погрузчики для погрузочных и вспомогательных работ. В качестве основных влияющих факторов при технологическом моделировании рассматривались: объемы подкарьерных запасов и их соотношение по зонам, удаленность от рудовыдачных выработок, характер распределения по содержанию полезного компонента, тип подъема, взаимное расположение рудовыдачных штолен и запасов, глубина перепуска рудной массы.

Экономико-математическая модель процесса транспортирования рудной массы прибортовых запасов позволяет установить зависимости себестоимости транспортирования 1 т руды до рудного склада от удаленности их от штольни и глубины ее заложения, и определить структуру оптимальной схемы транспортирования рудной массы при различных глубинах залегания подкарьерных запасов и расположении их относительно контура карьер.

Анализ результатов моделирования в исследуемом диапазоне показал, что эффективность транспортирования определяется взаимным расположением в бортах карьера запасов и рудовыдачных выработок-штолен, наклонных съездов. Минимальные затраты на транспорти-

рование рудной массы достигаются при расположении штольни на уровне или ниже уровня залегания относительно прибортовых запасов. Установлено, что при расположении прибортовых запасов ниже уровня штольни следует применять шахтный клетевой подъем, где стоимость транспортирования будет определяться глубиной расположения концентрационного горизоннта. Использование подземных самосвалов в этом случае повышает себестоимость перемещения по сравнению с клетевым подъемом в 1,3—1,6 раза (рис. 2). Рациональной схемой перемещения придонных запасов в сочетании с электровозным транспортом является клетевой подъем, при высоте перепуска более 150 м — скиповой. Использование карьерного автотранспорта и подземных самосвалов ведет к росту себестоимости в 1,5 раза (рис. 3).

Разработанная методика выбора технологических схем транспортирования рудной массы позволяет установить оптимальные состав и параметры технологических схем транспортирования рудной массы и их динамики в период отработки подкарьерных запасов при условии производ-

ства горных работ на нескольких участках приконтурной зоны, запасы которой характеризуются различным соотношением объемов и качества в прибортовой и придонной частях карьера. Использование настоящей методики моделирования процессов транспортирования рудной массы позволяет определить требуемый уровень стабилизации объемов и качества рудопотоков на основе рационального сочетания транспортных схем.

Разработанная методика технологического моделирования перемещения рудной массы при отработке запасов переходной зоны позволяет определить оптимальные транспортные схемы перемещения рудной массы из конкретных участков прибортовых и придонных запасов, характеризующихся различным соотношением количества и качеством рудной массы. На основе определенных оптимальных транспортных схем, возможно, установить наиболее эффективную технологическую схему перемещения рудной массы за весь период освоения переходной зоны на основе сочетания различных транспортных схем с различными характеристиками рудопотоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каглунов Д.Р., Калмыков В.Н., Рыльникова М.В. Комбинированная геотехнология. — М.: издательский дом «Руда и металлы», 2003. — 560 с.

2. Григорьев В.В., Калмыков В.Н., Рыльникова М.В. Опыт развития работ в карьере при переходе на подземную доработку Учалинского месторождения // Горный журнал. — 2010. — №5 — С.88—92

3. Дувалян С.В. Методы и алгоритмы решения задач планирования и учета на же-

лезнодорожном транспорте. // М.: Транспорт, 1969. — 256с.

4. Рахмангулов А.Н. Методы оптимизации транспортных процессов. // Магнитогорск. МГУТ им. Г.И. Носова, 1999. — 114 с.

5. Интернет источник: <http://logintra.ru/glavnaya/biblioteka/kompiuternie-programmi/makros-postroeniya-tablitsi-optimalnich-putey.html>. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Гибадуллин Закария Равгатович — генеральный директор ОАО «Учалинский ГОК»;

Калмыков Вячеслав Николаевич — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой,

Рахмангулов Александр Нельевич — кандидат технических наук, доцент,

Петрова Ольга Викторовна — кандидат технических наук, доцент,

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, e-mail: pmpri@magtu.ru.