

В.Ю. Верешак, Д.М. Казикаев

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА И ОПТИМИЗАЦИЯ КАЧЕСТВА ТРАНСПОРТИРУЕМОЙ РУДНОЙ МАССЫ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Описан один из возможных подходов к вопросу оптимизации качества транспортируемой рудной массы при комбинированной (открыто-подземной) разработке месторождений полезных ископаемых. Оптимизация производится с использованием вероятностного метода Монте-Карло. Основное внимание уделено определению таких исходных параметров добычи на каждом из нескольких забоев, которые обеспечивают наиболее близкое соответствие показателей качества общего потока рудной массы установленному обогатительной фабрикой плану.

Ключевые слова: комбинированная разработка рудных месторождений, открыто-подземная разработка рудных месторождений, транспортная система рудника, качество рудной массы, вероятностная оценка, математическая модель, метод Монте-Карло, оптимизация, статистический анализ.

Комбинированная разработка месторождений, как совмещение открытых и подземных горных работ, уже несколько десятилетий является одним из основных подходов, используемых во всем мире для извлечения полезных ископаемых из недр земли. Это происходит по ряду причин, главной из которых является возможность использовать лучшие свойства открытого и подземного способов, существенно снижая при этом стоимость добычи, повышая безопасность труда, смягчая негативное влияние горных работ на окружающую среду и в целом увеличивая эффективность горнодобывающего производства.

Одним из основных компонентов, оказывающих влияние на стоимости добычного процесса, является система транспорта отбитой рудной массы. Известно, что доля стоимости транспорта в общей себестоимости конечного продукта горнодобывающих предприятий может достигать до 60% [1], [2]. Своевременный и эффективный транспорт вскрышных пород, рудной массы, обогатленной руды и хвостов обогащения является важнейшей частью процесса добычи полезных ископаемых.

Комбинированная разработка позволяет создавать и применять существенно менее затратные и более надежные транспортные схемы,

делая себестоимость конечного продукта ниже и увеличивая прибыль горнодобывающих предприятий [3].

Эти вопросы становятся все более актуальными для мировой горной промышленности, в свете чего приобретают интерес задачи о дальнейшей оптимизации

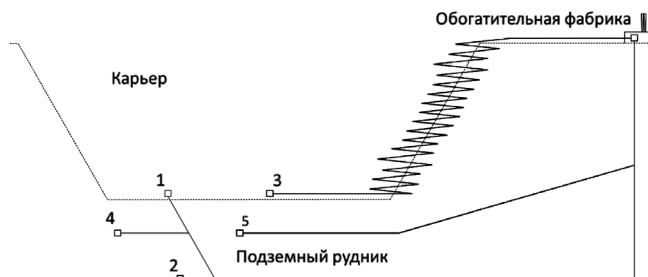


Рис. 1. Условие задачи: транспортные схемы

качества транспортируемой рудной массы при комбинированной разработке месторождений полезных ископаемых. Для решения одной из таких задач была составлена математическая модель, основанная на вероятностном методе Монте-Карло. Более подробное описание самой модели приведено в отдельной статье. Далее рассмотрено возможное решение задачи с использованием математической модели.

По условиям задачи дан карьер и подземный рудник, которые работают совместно. Добыча ведется на пяти забоях, два из которых расположены на поверхности, а три – в подземном пространстве. С каждого забоя отбитая рудная масса перемещается на обогатительную фабрику по соответствующей транспортной схеме, что, в конечном счете, приводит к формированию единого потока рудной массы (рис. 1). Требуется оптимизировать входные параметры для каждого забоя таким образом, чтобы обеспечить выполнение плановых показателей, установленных обогатительной фабрикой на определенный период времени.

Входными параметрами являются:

- максимальная мощность забоев (пропускная способность транспортных схем), т/мес;
- среднее содержание полезного компонента в рудной массе забоев, %;

- изменчивость среднего содержания, %.

Численные значения этих параметров, согласно условиям задачи, представлены в табл. 1. В дополнение, задан обобщенный коэффициент эффективности транспортных схем. Его использование не является обязательным, но позволяет в конце отобрать из нескольких найденных решений одно, наиболее оптимальное. Вернемся к нему позже.

Требования обогатительной фабрики выражаются в необходимости за один месяц обеспечить добычу рудной массы в количестве 3 200 000 т, со средним содержанием полезного компонента в ней в 1,55% и изменчивостью последнего показателя – не более, чем 0,26%.

Одним из возможных методов решения этой задачи является линейный метод. Такое решение можно выполнить почти автоматически в любой, даже самой простой, программе с функциями математического анализа (например, Microsoft Excel). Решение выполняется в два этапа: вначале проводится оптимизация по мощности забоев (пропускная способность транспортных схем), затем – по содержанию полезного компонента в рудной массе. В результате получается конечный набор численных значений этих параметров. В этом состоит сильная

Таблица 1

Условия задачи

Параметр	Ед. изм.	Номер забоя (транспортной схемы)				
		1	2	3	4	5
Максимальная производительность забоя (пропускная способность транспортной схемы)	т/мес	510 000	760 000	1 100 000	600 000	750 000
Среднее содержание полезного компонента в рудной массе забоя	%	3,00	1,75	0,90	0,85	1,63
Изменчивость среднего содержания	%	0,50	0,22	0,20	0,15	0,27
Обобщенный коэффициент эффективности	ед.	0,91	0,85	0,57	0,77	0,89

сторона такого метода решения. Эти значения можно использовать для составления плана ведения добычных работ.

В то же время, известно, что в реальности, события, как правило, развиваются не совсем так, как это было запланировано. Или во всяком случае, это вполне может произойти. На практике, существует множество параметров (обстоятельств), предска-

зать поведение которых и учесть его довольно сложно. Например, в данном случае, согласно результатам решения линейным методом, для обеспечения выполнения установленного обогащательной фабрикой плана, необходимо в каждые из 30 суток (условно – месяц) на первом забое добывать 13 533 т рудной массы с содержанием 3,040291%; на втором – 21 866 т с содержанием 1,815101%; и т.д. Однако во-первых, по самым разным на то причинам, может получиться так, что в точности показатели по количеству рудной массы каждый день выполнить не удастся, а во-вторых, что наверняка, содержанием полезного компонента в еще не отбитой руде управлять невозможно. Неизвестно даже, каким оно будет. Хорошо, если содержание будет соответствовать данным геологической разведки. А что, если нет?

Таким образом, при отработке месторождения совместно открытым и подземным способом нельзя говорить о существовании единственно верного решения задачи о качестве транспортируемой рудной массы. Более практичная формулировка, как исходных, так и конечных параметров – диапазоны значений. Для определения минимальных и максимальных значений этих диапазонов можно использовать вероятностный метод Монте-Карло.

В рамках посвященной данному вопросу научной работы, проведенной в Московском Государ-

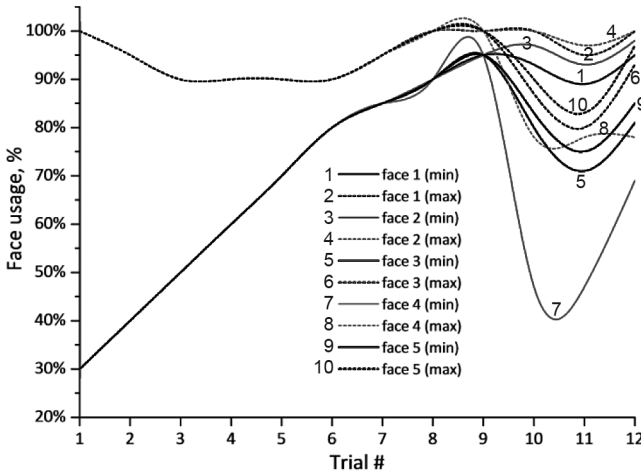


Рис. 2. График изменения наиболее вероятного значения общего количества добытой (транспортированной) рудной массы в ходе первых 12 экспериментов

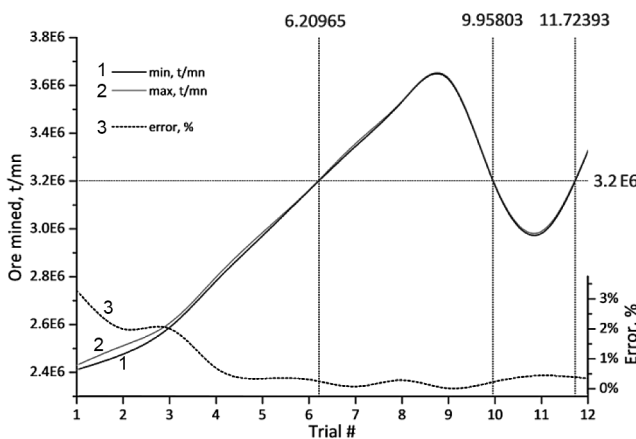


Рис. 3. График изменения коэффициента использования производительности забоев (транспортных схем) в течение первых 12 экспериментов

Таблица 2

Коэффициент использования производительности

		Решение 1	Решение 2	Решение 3
Забой 1	мин	81,19%	92,88%	92,11%
	макс	90,36%	99,80%	97,28%
Забой 2	мин	81,19%	96,72%	95,35%
	макс	90,36%	99,72%	98,12%
Забой 3	мин	81,19%	80,44%	76,68%
	макс	90,36%	87,25%	87,69%
Забой 4	мин	81,19%	48,29%	62,24%
	макс	90,36%	78,35%	78,04%
Забой 5	мин	81,19%	83,31%	80,69%
	макс	90,36%	90,20%	91,22%

ственном Горном Университете, было проделано 19 экспериментов с математической моделью. Результаты были сведены в единую таблицу для последующего анализа. Это число может показаться небольшим на первый взгляд, однако имея ввиду вероятностную природу метода исследования, число экспериментов может быть бесконечно большим и провести их все не представляется возможным. Каждый эксперимент, несмотря на использование средств программного обеспечения, достаточно трудоемко и занимает много времени. Кроме того, идея работы заключается прежде всего в том, чтобы сделать процесс нахождения значений искомых параметров больше ручным, чем автоматическим; решить задачу графически, поэтапно анализируя данные на каждой стадии оптимизации.

Процесс анализа начинается с построения графика коэффициента использования максимальной мощности забоев (пропускной способности транспортных схем), который задается в процентах и представляет собой отношение фактически используемой производительности к максимально возможной. Он нужен для того, чтобы представить исходные данные по

производительности в виде более контролируемого диапазона значений. Теперь этот показатель может меняться не только от 0 до максимального значения, как это было в исходном варианте задачи, а например, от 30 до 70%, или от 44 до 91%. Рассмотрим первые 12 экспериментов (рис. 2). График показывает, как менялся (задавался) коэффициент использования производительности в ходе исследования.

В зависимости от изменения этого параметра менялось одно из искомых по условиям задачи значений – общее количество добытой рудной массы – которое рассчитывалось так же, в виде диапазона (рис. 3). На графике видно три точки пересечения искомого параметра с плановой отметкой в 3,2 млн. тонн/мес. Проекция этих точек на ось X дают интерполированные значения номеров экспериментов.

Перенесем найденные значения на график изменения коэффициента использования мощности забоев в виде вертикальных линий и считаем значения проекций точек пересечения на вертикальную ось графика (рис. 4). Получим три набора численных значений, которые представляют собой границы диапазонов коэффициента использования мощности забоев

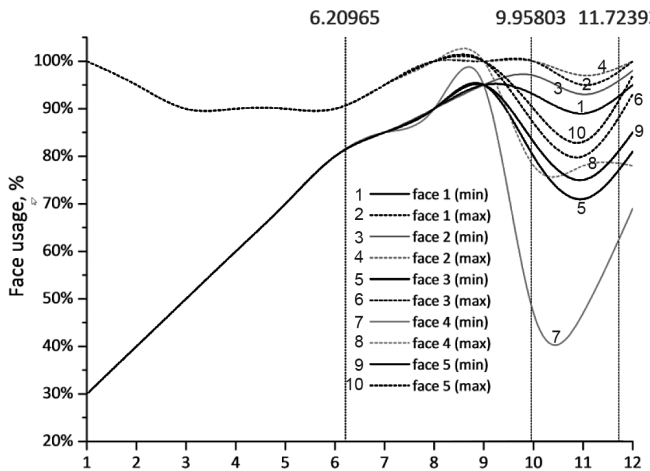


Рис. 4. График изменения наиболее вероятного значения среднего содержания полезного компонента в общем потоке рудной массы в ходе первых 12 экспериментов

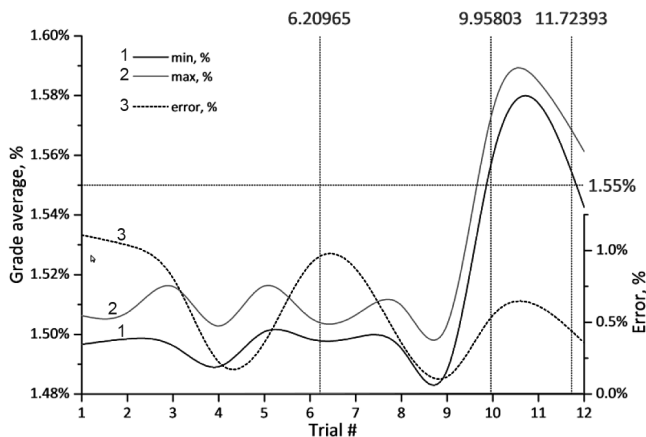


Рис. 5. График изменения наиболее вероятного значения изменчивости среднего содержания полезного компонента в общем потоке рудной массы в ходе первых 12 экспериментов

(табл. 2). Смысл состоит в следующем. Если количество добытой рудной массы на каждом из забоев в течение 30 дней будет меняться произвольным образом в пределах данных диапазонов, общее количество добытой рудной массы за месяц с наибольшей вероятностью будет соответствовать установленному обогатительной фабрикой плану.

Далее, по значениям номеров экспериментов, построим вертикальные линии на графике изменения среднего содержания полезного компонента в общем потоке рудной массы, поступающем на обогатительную фабрику (рис. 5). Считаем значения. Из графика видно, что в первом случае среднее содержание ниже планового, в двух других – выше. Проверим лежат ли данные значения в пределах, установленных обогатительной фабрикой.

Для этого сделаем аналогичные построения на графике изменчивости среднего содержания (рис. 6). Видно, что во всех трех случаях, изменчивость находится существенно ниже значения, которое требует обогатительная фабрика по результатам месяца. Из этого следует, что все найденные решения являются верными.

Ранее было упомянуто об обобщенном коэффициенте эффективности транспортной схемы. Теперь, когда найдено три решения задачи, можно использовать этот параметр для выбора наиболее оптимального из них. Этот коэффициент представляет собой услов-

ную величину, которая в конечном счете отражает стоимость транспорта рудной массы по данной схеме. К примеру, это может быть техническое состояние оборудования, квалификация операторов, погодные условия и т.д. Коэффициент является связью с возможными уже проведенными или дальнейшими исследованиями по данной теме. Схемы с наибольшим коэффици-

Таблица 3

Поиск оптимального решения

		Решение 1	Решение 2	Решение 3
Забой 1	мин	81,19%	92,88%	92,11%
	макс	90,36%	99,80%	97,28%
Забой 2	мин	81,19%	96,72%	95,35%
	макс	90,36%	99,72%	98,12%
Забой 3	мин	81,19%	80,44%	76,68%
	макс	90,36%	87,25%	87,69%
Забой 4	мин	81,19%	48,29%	62,24%
	макс	90,36%	78,35%	78,04%
Забой 5	мин	81,19%	83,31%	80,69%
	макс	90,36%	90,20%	91,22%

ентом эффективности считаются самыми дешевыми.

Процесс выбора самого оптимального решения из трех (в данном случае) происходит следующим образом. Вначале рассматриваются транспортные схемы с наибольшим и наименьшим значениями коэффициента эффективности (соответственно первая и третья). Для первой схемы, как для самой дешевой, из трех выбирается решение с наибольшей загруженностью – решение 2 (табл. 3). Для третьей схемы, –

с наименьшей, т.к. транспортирование рудной массы по ней будет самым дорогим. Аналогично рассматриваются следующие самая дорогая и дешевая схемы – четвертая и пятая. Для обеих схем самым оптимальным является решение 2. Поскольку последнюю, вторую, схему сравнивать не с чем и решение 2 является оптимальным в большинстве случаев, оно признается самым оптимальным.

Таким образом, в статье показано, что задача об оптимизации качества транспортируемой рудной массы при

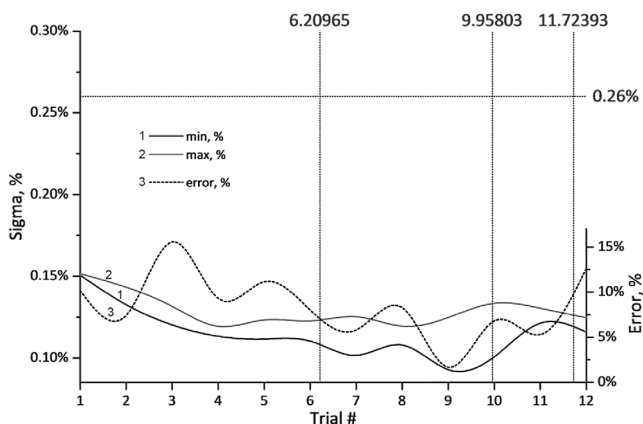


Рис. 6. График изменчивости наиболее вероятного среднего содержания полезного компонента в общем потоке рудной массы в ходе всех 19 экспериментов

комбинированной разработке имеет не одно, а множество решений. Приведена методика нахождения этих решений и самого оптимального из них. Она может быть адаптирована под нужды конкретного горнодобывающего предприятия, успешно реализована в качестве программного обеспечения и использована, как дополнительный инструмент предварительной оценки возможности выполнения установленных обогатительной фабрикой плановых показателей.

Статья публикуется впервые.

1. Alberts B.C. Spotlight on materials handling in open-pit mines // Journal of South-African Institute of Mining and Metallurgy. – 1984. – January. – Pp. 25–28.

2. Trends in mine haulage, S. Narayana Moorthy, Everything Mining, Focus – Global mining industry, May 2009, p. 1–3.

3. Казикаев Д.М. Комбинированная разработка рудных месторождений: учебник для вузов. – М.: Издательство МГТУ, 2008. – 360 с. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Верешчак Владимир Юрьевич – аспирант, e-mail: ya@vladimir-v.name, web: www.vladimir-v.name.

Казикаев Джек Мубаракович – доктор технических наук, профессор, МГИ НИТУ «МИСиС».

UDC 622.693:681.3

COMBINED OPEN-PIT AND UNDERGROUND MINING TRANSPORTATION SYSTEMS: ORE MASS' QUALITY PROBABILISTIC EVALUATION AND OPTIMIZATION

Vereshchak V.Yu., Graduate Student, e-mail: ya@vladimir-v.name, web: www.vladimir-v.name,

Kazikaev D.M., Doctor of Technical Sciences, Professor,

Moscow Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS».

Being one of the most common approaches in this field, a simultaneous use of open-pit and underground mining provides great opportunities for saving costs, increasing labor safety and mitigating negative environmental influence of mining operations, making them generally more effective. A transportation system is a vital component of any mine. It may take up to the 60% of the final product's prime cost. Further research and optimization in field are of a big interest. This article looks at the probabilistic approach of optimizing one of the issues that may arise whilst transporting the ore mass from the faces to the beneficiation plant, using the state-of-the-art mathematical method – Monte-Carlo. This is a part of the research conducted by Vladimir Vereshchak under the supervision of PhD, prof. Kazikaev D.M. in Moscow State Mining University during the years of 2011–2014.

Key words: combined open-pit and underground mining method, mine's transport system, ore mass' quality, probabilistic evaluation, mathematical model, Monte-Carlo method, optimization, statistical analysis.

REFERENCES

1. Alberts B.C. Spotlight on materials handling in open-pit mines, *Journal of South-African Institute of Mining and Metallurgy*, 1984, January, pp. 25–28.

2. Trends in mine haulage, S. Narayana Moorthy, Everything Mining, Focus – Global mining industry, May 2009, p. 1–3.

3. Kazikaev D.M. *Kombinirovannaya razrabotka rudnykh mestorozhdenii: uchebnik dlya vuzov* (Combination technology of ore mining: Textbook for high schools), Moscow, Izdatel'stvo MGGU, 2008, 360 p.

