

В.Ю. Верешак**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЛИНЕЙНОГО И ВЕРОЯТНОСТНОГО МЕТОДОВ ПРИМЕНительно К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ОБ ОПТИМИЗАЦИИ КАЧЕСТВА ПОТОКА РУДНОЙ МАССЫ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ (ОТКРЫТО-ПОДЗЕМНОЙ) РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

В условиях постоянно изменяющихся качественных и количественных характеристик процесса добычи и транспортировки рудной массы обеспечение однородности поступающей на обогатительную фабрику руды является трудной задачей и одного линейного метода может быть недостаточно. Основанная на вероятностном методе Монте-Карло, специально разработанная для решения подобных задач математическая модель является хорошим дополнением. Она позволяет провести симуляцию процесса, понять его более глубоко, оценить возможные риски и принять более обоснованные решения. В данной статье приведен примерный сравнительный расчет одной из подобных задач как линейным, так и вероятностным методом. Ключевые слова: математическая модель, сравнительный анализ, метод Монте-Карло, комбинированная разработка рудных месторождений, вероятностная оценка, оптимизация, статистический анализ, открыто-подземная разработка рудных месторождений, транспортная система рудника, качество рудной массы.

Содержание полезного компонента в рудной массе забоев постоянно изменяется. Линейный метод позволяет рассчитать количество рудной массы, которое необходимо отбить на каждом из забоев, чтобы обеспечить однородность качества поступающего на обогатительную фабрику потока рудной массы. Пользоваться линейным методом можно один раз в сутки, несколько раз в смену вручную или, сделав систему автоматической, проводить расчеты каждый час или даже непрерывно. Все зависит от того, как часто можно производить замер содержания полезного компонента в рудной массе в непосредственной близости к месту работы погрузочного средства в забое. Очевидно, что чем чаще будут проводиться замеры и соответствующие корректировки, тем более однородным по качеству будет общий поток рудной массы. С другой стороны, если в работу активно вовле-

чены люди (что в большинстве случаев так), слишком частые корректировки процесса невозможны.

Предлагаемый способ решения задачи (на основе вероятностного метода Монте-Карло) не является заменой линейного метода, но позволяет более глубоко оценить процесс добычи и транспорта рудной массы в условиях комбинированной (открыто-подземной) разработки месторождений полезных ископаемых. В результате такого анализа появляется возможность прогнозировать наиболее вероятное развитие ситуации еще до того, как с ней придется столкнуться. Ниже на конкретном примере рассмотрен один из возможных сценариев работы системы из пяти забоев и соответствующих им транспортных схем и поэтапно разобраны качественные характеристики рудной массы.

По условиям поставленной задачи, имеется пять точек погрузки (забоев

и, соответственно, транспортных схем) с определенной максимальной производительностью, средним ожидаемым содержанием полезного компонента (ПК) и его изменчивостью. Необходимо, чтобы на обогатительную фабрику поступал как можно более однородный по качеству (с изменчивостью не более 0,26%) поток рудной массы со средним содержанием ПК в 1,55%. Общий объем добычи за месяц должен составить 3 200 000 т рудной массы.

Линейный метод дает следующее решение. На первом забое необходимо в сутки добывать 13 533 т рудной массы с содержанием ПК 3,04%, на втором – 21 867 т с содержанием ПК в 1,82%, на третьем, четвертом и пятом забоях 33 200 т / 1%, 16 533 т / 0,9% и 21 533 / 1,69% соответственно. Если удастся выполнять эти условия в каждый момент времени, 30 суток подряд, план будет выполнен в точности.

Очевидно, что в реальной ситуации это не представляется возможным – количественные и качественные

характеристики процесса будут постоянно меняться. Можно, как было сказано выше, учитывать эти изменения и проводить расчет линейным методом чаще. При этом, если расчеты и последующие корректировки будут осуществляться непрерывно, в автоматическом режиме, изменчивость содержания практически сводится к нулю, т.к. количество добываемой рудной массы всякий раз подбирается таким образом, чтобы содержание ПК в общем потоке было равно требуемому (в данном случае – 1,55%). Если проводить расчеты реже (несколько раз в смену, раз в сутки), полученные значения можно использовать в качестве текущего оперативного плана и важность изменчивости содержания существенно повышается. В любом случае, для правильного планирования и организации процесса необходимо понимать вероятность получения тех или иных значений. Это позволяет сделать предложенный метод анализа.

Рассмотрим возможное поведение значения содержания полезного

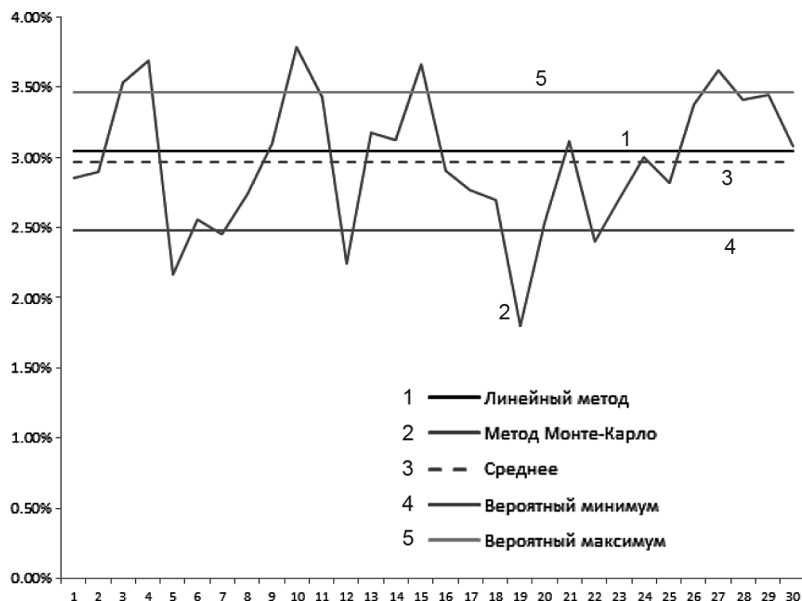


Рис. 1. Симуляция значения содержания полезного компонента на первом забое

Таблица 1

Пример расчета при изменяющемся содержании полезного компонента и постоянном количестве добываемой рудной массы

Сутки	Содержание ПК	Добыто РМ, т	Руда, т
1	2,85%	13 533,33	385,87
2	2,90%	13 533,33	392,16
3	3,53%	13 533,33	477,51
4	3,69%	13 533,33	499,66
5	2,17%	13 533,33	293,38
6	2,56%	13 533,33	346,14
7	2,45%	13 533,33	331,52
8	2,74%	13 533,33	370,51
9	3,10%	13 533,33	419,47
10	3,79%	13 533,33	512,37
11	3,43%	13 533,33	464,07
12	2,25%	13 533,33	304,01
13	3,18%	13 533,33	429,88
14	3,12%	13 533,33	422,17
15	3,66%	13 533,33	495,47
16	2,90%	13 533,33	392,79
17	2,77%	13 533,33	374,40
18	2,69%	13 533,33	364,29
19	1,80%	13 533,33	244,02
20	2,54%	13 533,33	343,88
21	3,11%	13 533,33	421,23
22	2,40%	13 533,33	324,36
23	2,71%	13 533,33	366,26
24	3,00%	13 533,33	406,42
25	2,82%	13 533,33	381,45
26	3,38%	13 533,33	457,26
27	3,62%	13 533,33	489,75
28	3,41%	13 533,33	461,05
29	3,45%	13 533,33	466,62
30	3,07%	13 533,33	416,11
			12 054,10

компонента на первом забое в течение одного месяца (рис. 1). Для остальных забоев процесс анализа идентичен; графики будут приведены в конце статьи.

Линия 1 показывает значение 3,04%, рассчитанное при помощи линейного метода. Предполагается, что значение остается постоянным в течение всего месяца. Ломаная линия 2 соединяет отметки, полученные вероятностным способом, и показывает, как могло бы меняться содержание полезного компонента за рассматриваемый период. Этот сценарий существенно отличается. Пунктирная линия 3 показывает среднее всех значений, рассчитанных методом Монте-Карло. Видно, что в среднем содержание ПК скорее всего будет ниже планового. Линия 4 снизу и линия 5 сверху отражают наиболее вероятные минимальное и максимальное значения соответственно.

Проведем краткий сравнительный анализ. Результат расчетов линейным методом для первого забоя – 13 533 т в сутки (406 000 т в месяц) с содержанием 3,04%. То есть, без учета потерь и разубоживания и при прочих равных условиях, на фабрику должно было поступить 12 342,4 т руды. В то же время, если бы содержание полезного компонента изменялось в соответствии с приведенным выше сценарием, а количество добытой в сутки

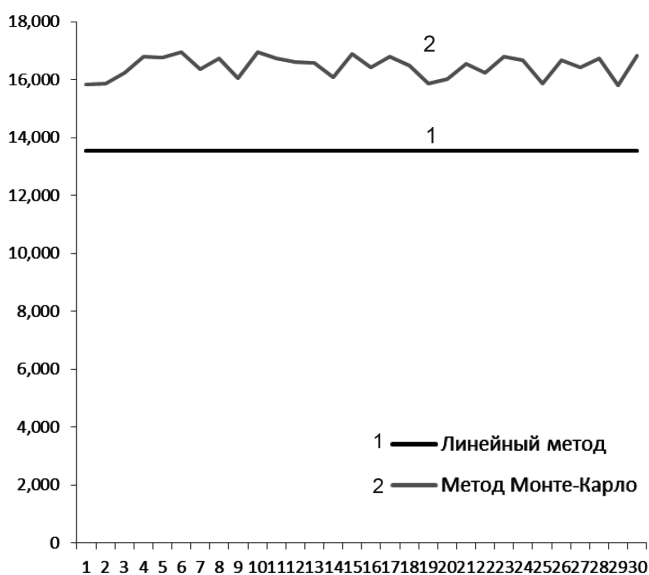


Рис. 2. Возможный сценарий изменения количества добываемой рудной массы на первом забое. Сравнение с линейным методом

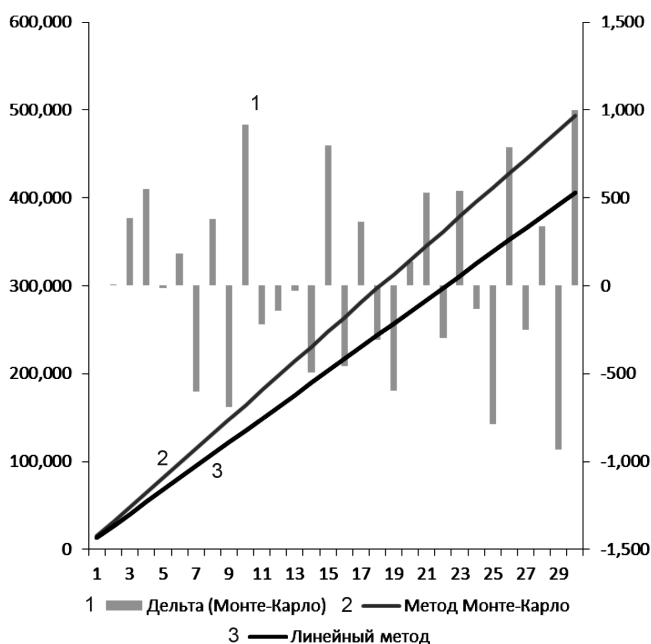


Рис. 3. Вероятное изменение количества добываемой рудной массы на первом забое, рассчитанное линейным методом и методом Монте-Карло (с накоплением)

Таблица 2

Пример расчета при изменяющихся значениях содержания полезного компонента в рудной массе и количества добываемой в сутки рудной массы на первом забое

Сутки	Содержание ПК	Добыто РМ	Руда
1	2,85%	15 842,00	451,70
2	2,90%	15 852,00	459,35
3	3,53%	16 235,00	572,84
4	3,69%	16 786,00	619,75
5	2,17%	16 773,00	363,61
6	2,56%	16 957,00	433,71
7	2,45%	16 353,00	400,60
8	2,74%	16 731,00	458,06
9	3,10%	16 041,00	497,20
10	3,79%	16 958,00	642,03
11	3,43%	16 739,00	574,00
12	2,25%	16 595,00	372,78
13	3,18%	16 569,00	526,31
14	3,12%	16 077,00	501,52
15	3,66%	16 873,00	617,74
16	2,90%	16 418,00	476,52
17	2,77%	16 780,00	464,22
18	2,69%	16 475,00	443,48
19	1,80%	15 879,00	286,31
20	2,54%	16 014,00	406,92
21	3,11%	16 544,00	514,94
22	2,40%	16 249,00	389,45
23	2,71%	16 789,00	454,37
24	3,00%	16 658,00	500,25
25	2,82%	15 870,00	447,32
26	3,38%	16 658,00	562,84
27	3,62%	16 409,00	593,81
28	3,41%	16 747,00	570,53
29	3,45%	15 817,00	545,36
30	3,07%	16 817,00	517,07
			14 664,57

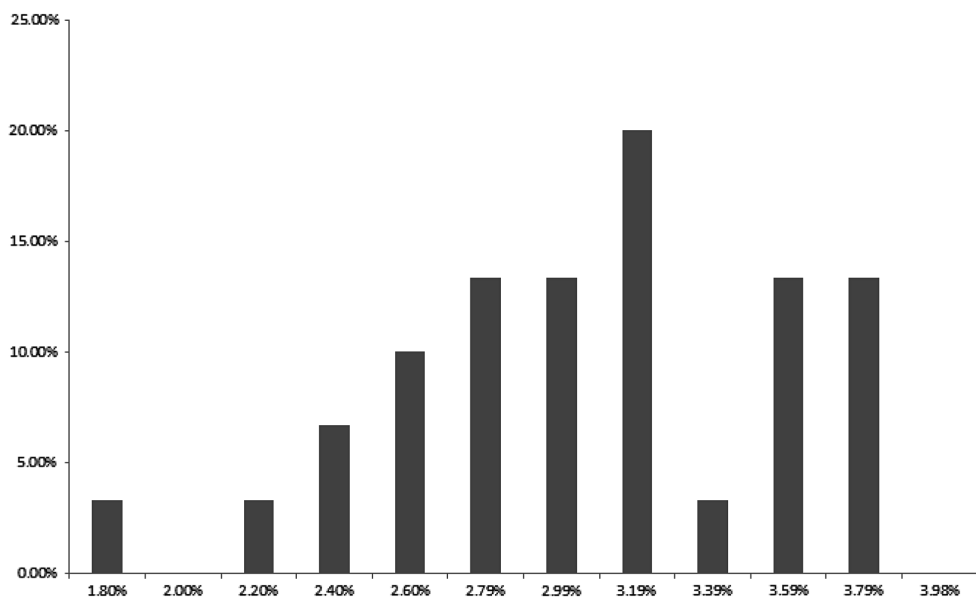


Рис. 4. Распределение вероятностей содержания полезного компонента в рудной массе первого забоя

рудной массы оставалось постоянным, получилось бы следующее (табл. 1).

Результат получился на 288,3 т (2,33%) руды меньше рассчитанного линейным методом. Добавим к расчету изменения количества добываемой в сутки рудной массы (рис. 2).

Дневные изменения выглядят большими, но если сравнить линейный сценарий и результат расчета методом Монте-Карло за месяц (рис. 3) – видно, что это не так.

Линия 2 (метод Монте-Карло) на этом графике, в отличие от линии 1, которая отображает результаты расчета линейным методом, вовсе не прямая. Гистограмма показывает разность количества добытой рудной массы в текущие и предыдущие сутки (дельта). Учтем эти изменения (табл. 2).

В этом случае на фабрику поступило бы 14 664,57 т (на 18,81% больше) руды. Стоит отметить, что рассматривается только первый забой, но просчитывались все пять одновременно. Поэтому избыток руды был бы компенсирован ее недостатком на

одном (или нескольких) из оставшихся забоев.

Следующим шагом является анализ распределения вероятностей содержания полезного компонента в рудной массе. Его можно провести графически (рис. 4).

Из приведенного графика видно, что с наибольшей вероятностью (20%) рудная масса на первом забое будет иметь содержание от 3,00 до 3,19%. В 40% случаев значение содержания может попадать в довольно широкую группу от 2,61 до 2,99%, либо от 3,40 до 3,79% – это трудно прогнозировать. Точнее можно сказать, что значение содержания ПК будет находиться в диапазоне от 2,41 до 2,60% в 10 случаях из 100. С вероятностью в 6,67% значение будет лежать между 2,21 и 2,40%, с вероятностью в 3,34% – будет меньше 1,8%, либо находиться в пределах 3,2 и 3,39%. Наконец, значение содержания полезного компонента, скорее всего, не будет больше 1,81 и меньше 2,00%, а также больше 3,79%.

Таким образом, анализ показывает, что возможности линейного метода, хоть и достаточные для быстрого нахождения решения задачи об оптимизации качества рудной массы при комбинированной разработке месторождений с приемлемой точностью,

могут быть успешно дополнены и расширены использованием метода Монте-Карло. Это позволит более глубоко понимать процесс транспорта рудной массы в таких условиях и принимать более информированные и обоснованные решения.

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Верешак Владимир Юрьевич – аспирант, e-mail: me@vladimir-v.name, web: www.vladimir-v.name, МГИ НИТУ «МИСиС».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. Alberts B.C. Spotlight on materials handling in open-pit mines // Journal of South-Af-

rican Institute of Mining and Metallurgy. Januar 1984, pp. 25–28.

3. Fernie A.D. Pit to plant – current trends, Wright Engineers Ltd., Vancouver, British Columbia, Mining Engineering, January 1985, pp. 49–54. **ГИАБ**

UDC 622:541.12.0122: 539.213.3

COMPARATIVE ANALYSIS OF LINEAR AND PROBABILISTIC APPROACHES AS APPLIED TO SOLVING A PROBLEM OF OPTIMIZING THE QUALITY OF THE ORE MASS FLOW ON A MINE, THAT UTILIZES A COMBINATION OF OPEN-PIT AND UNDERGROUND MINING METHODS

Vereshchak V.Yu., Graduate Student, e-mail: me@vladimir-v.name, web: www.vladimir-v.name, Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia

In an ever-changing quantitative and qualitative characteristics of ore extraction and transportation process, ensuring a uniform quality of the coming to a beneficiation plant ore flow is a challenging task and simply using a linear method may not be enough. Based on a probabilistic Monte Carlo method, a specially designated for such tasks mathematical model was designed – it is a good addition. With it, one is able to simulate the process, in order to get a deeper understanding of it, assess risks and make better decisions. This article presents a comparison between linear and probabilistic calculations, using of one of similar problems as an example.

Key words: mathematical model, comparative analysis, Monte Carlo method, open-pit and underground mining methods combination, probabilistic assessment, optimization, statistical analysis, mine transport system, ore mass quality.

REFERENCES

1. Kazikaev D.M. *Kombinirovannaya razrabotka rudnykh mestorozhdenii: uchebnik dlya vuzov* (Комбинированная разработка рудных месторождений. Textbook for high schools), Moscow, Izdatel'stvo MGGU, 2008, 360 p.

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

3. Fernie A.D. *Pit to plant current trends*, Wright Engineers Ltd., Vancouver, British Columbia, Mining Engineering, January 1985, pp. 49–54.

