

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.013

СТОХАСТИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ РУДНИКА НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ESCONDIDA NORTE (ЧИЛИ)

Л. Монтель, Р. Димитракопулос

*COSMO — Лаборатория стохастического производственного
планирования работы горнорудных предприятий,
Департамент горного дела и материальных потоков,
Университет Макгилла, НЗА 2А7, Монреаль, Канада,
E-mail: luis.montiel@mail.mcgill.ca; roussos.dimitrakopoulos@mcgill.ca*

Горно-обогажительный комплекс — это несколько действующих рудников с многочисленными технологическими процессами, складами расходных материалов и конечной продукции. Современные методы стохастической оптимизации дают исключительно локальные оптимальные решения, т. е. не рассматривают горно-обогажительный комплекс в целом. Предложен расширенный итерационный метод разработки, учитывающий риски долгосрочных производственных планов работы предприятий, добывающих различные типы полезных ископаемых и включающих систему технологических процессов рудоподготовки. В методе использован прием “имитации отжига” на основе минимизации отклонений потоков обогащенной руды и породы от производственных целей. Предложенный метод опробован на месторождении медной руды Escondida Norte в Чили, где сульфидные, окисленные, смешанные руды и породу получают в действующих технологических циклах измельчения, био- и кислотного выщелачивания. Стохастическое планирование обеспечивает менее 5 % отклонения от проектных показателей процессов измельчения и выхода пустой породы, что позволяет исключить косвенные затраты на простаивающие производственные мощности. В то же время план, разработанный по традиционной методике, дает около 20 % отклонения от производственных заданий.

Горнодобывающий комплекс, “имитация отжига”, технологические потоки цикла рудоподготовки, производственное планирование работы рудника

ВВЕДЕНИЕ

Работа горно-обогажительного комплекса — это последовательность операций безопасного извлечения минерального сырья, его транспортировки на одну или несколько обогажительных фабрик или в отвал в зависимости от требований к качеству и объему добытого сырья. Цель

Работа выполнена при финансировании Национального научно-исследовательского совета науки и техники, Канада, R&D Grant CRDPJ 411270-10 при сотрудничестве AngloGold Ashanti, Barrick Gold, BHP Billiton, De Beers, Newmont Mining and Vale to R. Dimitrakopoulos.

планирования работы рудника — непрерывная работа всех технологических линий путем разработки плана, отвечающего производственным целям с максимальными дисконтированными денежными потоками. В традиционных методах планирования работы рудника и оптимизации карьера расчеты выполняют на усредненных моделях единичных рудных тел без учета неопределенностей, связанных с пространственным распределением полезного ископаемого. В [1–4] сделан вывод, что геологическая неопределенность является основным фактором невозможности соответствовать производственным целям и выработать надежный прогноз проектных ожиданий добычи руды. В последние десять лет разработаны новые методы, учитывающие эту неопределенность для открытого рудника и планирования эксплуатационного ресурса рудника (ЭРР) [5]. Они доказали свою эффективность при контроле риска отклонения от производственных целей с ростом прогнозируемого NPV, так же как и объема извлекаемого металла, что способствует рациональной эксплуатации невозобновляемых природных ресурсов [4, 6–9]. В дальнейшем методы были усовершенствованы, включив совместное рассмотрение геологической и рыночной неопределенности [10, 11] и вопросы эффективности расчетов [12].

Авторы [4, 13] провели исследования в области стохастической оптимизации прогноза эксплуатационного ресурса рудника и разработали многоступенчатый метод прогноза ЭРР с учетом геологической неопределенности на основе “имитации отжига” [14–16]. Исследователи верифицировали новый метод на золотодобывающем карьере Fimiston, Западная Австралия. Согласно их оценкам, прогнозируемые отклонения от производственных целей в стохастическом производственном плане составляют менее 4 % для всех производственных периодов, в то время как планы, разработанные традиционными методами, прогнозируют приблизительно 12 % отклонения. Более того, NPV повышается на 28% относительно результатов, получаемых традиционными методами. В [17] рост прогнозируемого NPV составил 26 % для месторождения бедных медных вкрапленных руд. В [18] расчеты авторов позволили увеличить границы карьера на 17 % для того же медного месторождения, что в конечном итоге привело к 9 % увеличению прогнозируемого NPV.

Даже с учетом геологической неопределенности указанный метод дает локальное решение в том смысле, что не рассматривает весь горно-обогатительный комплекс [19]. Горно-обогатительный комплекс может состоять из нескольких шахт с многочисленными технологическими потоками и складами различной продукции (рис. 1). Оптимальное решение, полученное для одной обогатительной фабрики, отличается от глобального оптимального решения для всего горно-обогатительного комплекса в случае необходимости поиска такого решения.

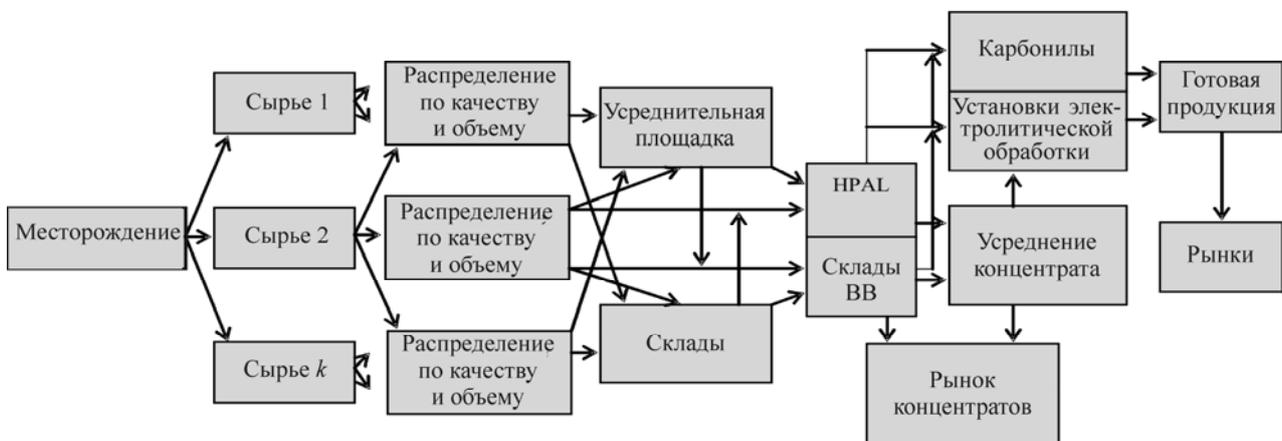


Рис. 1. Горно-обогатительный комплекс: НРАЛ — склад кислот и щелочей

В процессе стохастической глобальной оптимизации [20] использован метод “имитации отжига” для проектирования очередности выемки блоков на горно-обогательном комплексе открытых рудников. С помощью нового метода сделана попытка минимизировать колебания объема добычи для каждого блока с учетом типа материала и неопределенности качества. Предлагаемый метод позволяет разработать стохастический производственный план рудника и рассматривать его как адаптацию многостадийного метода с “имитацией отжига” [4, 13] применительно к горно-обогательным комплексам с разными типами добываемых руд и многочисленными технологическими потоками. Дано описание этого метода, его применение для производственного планирования работы на медном месторождении Escondida Norte и, наконец, выводы и рекомендации для последующих исследований.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭРР С ТРАНСПОРТИРОВКОЙ РУДЫ/ОТХОДОВ НА НЕСКОЛЬКО ПЛОЩАДОК С ПОМОЩЬЮ “ИМИТАЦИИ ОТЖИГА”

Многостадийный метод стохастического перспективного планирования ЭРР (рис. 2) предполагает наличие: 1) ряда стохастических моделей рудных тел [17–19], 2) заданной производительности добычи, 3) автоматизированной системы планирования работы рудника на основе моделей рудного тела, 4) алгоритма “имитации отжига” (SA).



Рис. 2. Итерационный метод стохастического перспективного производственного планирования [17]

SA — метаэвристический метод решения больших комбинаторных задач на основе принципа стохастической релаксации [16]. Стохастическая релаксация — это класс оптимизационных алгоритмов, которые произвольно возмущают (отклоняют от исходного состояния) текущее состояние системы и определяют возникающие вследствие этого изменения производительности, позволяющие временное снижение значения целевой функции. SA постепенно возмущает начальное решение для достижения соответствия с ограничениями задачи, чем достигается соответствие с задачами производственного планирования работы рудника. Алгоритм предполагает наличие целевой функции, регулирующей отклонение между целевыми и текущими производственными показателями в решении для каждого возмущения. Стадии алгоритма:

- 1) определить начальное решение;
- 2) вычислить начальное значение целевой функции;
- 3) возмутить решение определенным способом, например перестановкой элементов решения;
- 4) вновь вычислить целевую функцию с учетом модификации предыдущего решения;
- 5) принять или отклонить возмущение на основе правила специального решения;
- 6) в случае принятия возмущения модифицировать решение до уровня соответствия новому возмущенному решению;
- 7) повторять стадии 3–6, пока целевые ограничительные факторы не достигнут приемлемого уровня или пока возмущения существенно не снизят целевую функцию.

Существует ряд критериев решения относительно принятия или отклонения данного возмущения в процессе оптимизации. Правило принятия решения, приемлемое в данном методе, обычно используют для принятия нежелательных возмущений согласно следующему распределению вероятности [16]:

$$\text{Prob}\{\text{Принятие } i - \text{возмущения}\} = \begin{cases} 1 & \text{при } O(i) \leq O(i-1), \\ \exp\left(\frac{O(i-1) - O(i)}{t(i)}\right) & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (1)$$

где $O(i)$ — целевая функция при возмущении i ; $t(i)$ — “температура отжига” (функция из алгоритма “имитация отжига”). Вероятность принятия нежелательного возмущения выше при повышенных температурах. С ростом оптимизации температура постепенно снижается на коэффициент, известный как “коэффициент охлаждения”. Цель — найти баланс между чрезмерно медленным снижением температуры, что нерационально увеличивает время сходимости, и ускоренным снижением, что может заморозить решение при каком-то локальном минимуме с далекими от ожидаемых значениями.

Задача минимизации средних отклонений от производственных целей (заданий в рабочие периоды N , S — модели рудного тела, а P — различные процессы) имеет вид

$$\min O = \sum_{n=1}^N \left(\sum_{s=1}^S \left| \sum_{p=1}^P \lambda_p \left| \theta_{np}^* - \theta_{np}(s) \right| \right| + \sum_{s=1}^S \lambda_\omega \left| \omega_n^* - \omega_n \right| \right), \quad (2)$$

где θ_{np}^* — задание по руде процесса p в период n ; ω_n^* — задание по пустой породе в период n ; θ_{np} — реальное производство руды процессом p в период n в модели рудного тела s ; ω_n — реальное производство породы в период n в модели рудного тела s ; λ_p , λ_ω — весовые коэффициенты.

На горно-обогащительных комплексах с различными типами сырья и многочисленными технологическими потоками извлеченный материал блоков может поступать на несколько обогащательных установок в зависимости от типа материала, т. е. обогащательные фабрики не всегда готовы принять все типы добываемого минерального сырья. Более того, при наличии возможности обогащательной установки перерабатывать два и более типов сырья стоимость его переработки и извлечения металла могут быть различны. Все это следует учитывать при разработке стратегии возмущения и определения типа решения алгоритма “имитации отжига”. В случае наличия многочисленных технологических потоков: (а) один тип материала или несколько, для любого блока типы материала остаются постоянными в моделях рудного тела — при этом решение алгоритма “имитации отжига” соответствует долгосрочному производственному плану с определением периодов и назначения блоков, подлежащих выемке; (б) несколько типов сырья, которые могут изменяться в пределах одного блока в различных моделях рудного тела — в этом случае возможным решением может быть последовательность выемки с определением периодов, но без назначения блоков, с тем чтобы исключить производство типа сырья, неприемлемого для имеющейся технологии обогащения. В последнем случае алгоритм должен учитывать целевое назначение исходной последовательности выемки, т. е. дать решение, определяющее время выемки для каждого блока, но с учетом целесообразности каждого сценария (модели рудного тела) на основе оптимального назначения.

На основе исходной последовательности рассчитывается вероятный период выемки каждого блока. Определенный блок — это блок, подлежащий выемке во всех исходных вариантах последовательности выемки, например наличие 100 %-й вероятности для его выемки в определенный период. Система блоков-кандидатов представлена в виде “неопределенных” блоков, для которых время выемки колеблется в рамках некоторых последовательностей. Так, в случае

(а) алгоритм произвольно выбирает блок-кандидат и заменяет текущий период выемки на другой, учитывая возможности, рассчитанные на основе исходной последовательности выемки и с учетом углов откоса бортов. Имеющаяся технология обогащения, обеспечивающая максимально объективный результат, рассматривается как целевая технология. В случае (б) потребуется дополнительный выбор цели, чтобы исключить нереализуемые технологические комбинации. Вновь полученное решение принимают или отвергают на основе правила принятия решения, описываемого (1).

Алгоритм возмущает начальное решение, пока не будет удовлетворен критерий остановки. Таким критерием может быть ситуация, когда текущее решение дает удовлетворительный минимум, общее число перестановок равно определенному пользователем максимуму или числу возмущений при данной “температуре отжига” или когда число возмущений без изменения целевой функции превышает максимальное заданное значение. Эти параметры должны быть установлены при выполнении “имитации отжига” и ее начальной температуры, а также понижающего или “охлаждающего” коэффициента.

Применение предлагаемого метода связано с рядом важных проблем. Метод рассматривает границы карьера в пределах исходной последовательности выемки. Оптимальные стохастические границы карьера, как правило, не совпадают с детерминистически полученными [8, 11, 13]. Таким образом, метод можно итеративно применять для различных определений границ карьера с тем, чтобы выбрать пределы, обеспечивающие максимальный NPV. Бортовое содержание руды учитывается косвенно при расчете последовательности выемки, когда блоки оцениваются относительно максимальной прибыльности по техническим и экономическим параметрам. Метод предполагает оценку производительности выемки относительно мощности процессов переработки.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА

ИНФОРМАЦИОННАЯ СПРАВКА. Метод используется на руднике Escondida Norte, Чили. Рудное тело представляет собой месторождение вкрапленной медной руды, залегающее в 170 км к юго-востоку от г. Антофагаста. Месторождение сформировано двумя основными стадиями сульфидов и одной стадией оксидной минерализации. Материал месторождения классифицируется пятью различными типами и приемлем для обогащения на трех действующих обогатительных фабриках или для отсортировки в отвал. На рис. 3 показаны возможные схемы переработки материала.

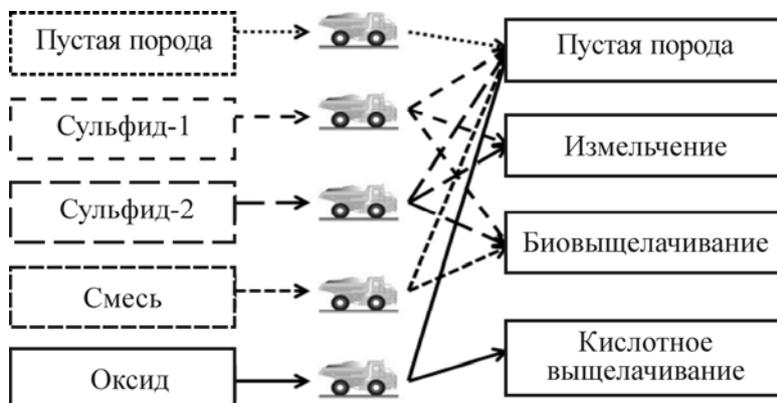


Рис. 3. Возможные схемы обогащения материала

Материал блока отправляется в отвал, если это пустая порода или если прибыль, полученная от извлеченной меди, не компенсирует производственных затрат. Оба типа сульфидов могут быть направлены в циклы измельчения или биовыщелачивания. Смесь подлежит только биовыщелачиванию, а оксиды — только кислотному выщелачиванию. Извлечение металла зависит от типа сырья и выбранного процесса обогащения.

Несколько стохастических моделей рудного тела Escondida Norte представлены в [21–23]. Ниже приведены рабочие и финансовые характеристики исходной последовательности выемки:

Производительность рудника, тыс. т/сут	500
Производительность цикла измельчения, тыс. т/сут	120
Производительность цикла кислотного выщелачивания, тыс. т/сут	60
Производительность цикла биовыщелачивания	Неограниченно
Цена на медь, \$/фунт	2
Стоимость добычи, \$/т	1.5
Стоимость цикла измельчения, \$/т	6
Стоимость цикла биовыщелачивания, \$/т	1.5
Стоимость цикла кислотного выщелачивания, \$/т	4
Дисконтная ставка, %	8
Ширина выемки, м	150

Среднее извлечение металла для типов материала и обогатительных циклов рассчитано на основе моделей и приведено в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Металлургическое извлечение

Тип материала	Измельчение, %	Биовыщелачивание, %	Кислотное выщелачивание, %
Сульфид-1	81	31.8	Неприемлемая комбинация
Сульфид-2	79.2	47.3	То же
Смесь	Неприемлемая комбинация	37.5	»
Оксид	То же	Неприемлемая комбинация	72.7

Модели рудного тела учитывают неопределенность содержания меди и типы сырья (рис. 4).

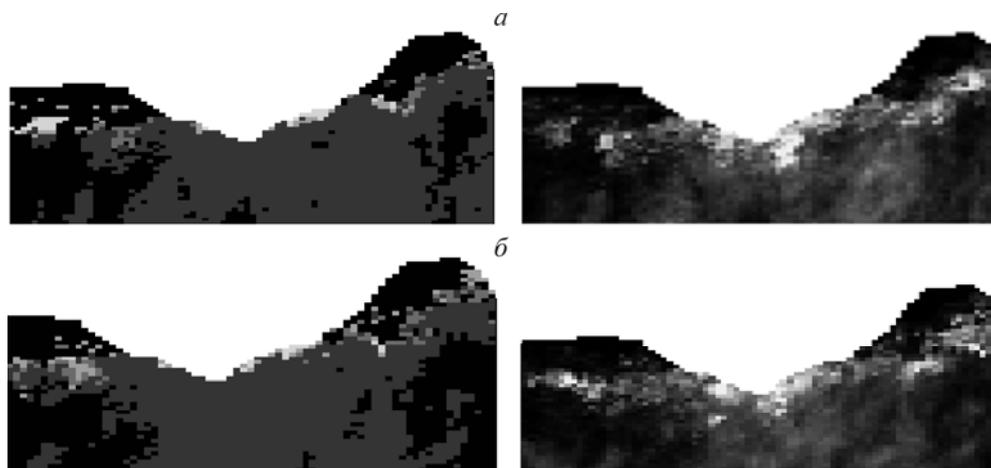


Рис. 4. Тип материала (слева) и содержание меди (справа) в разрезе $Y = 114037.5$: *а* — модель рудного тела № 5; *б* — модель рудного тела № 10

Так, для конкретного блока тип сырья может быть различным в разных моделях. Следовательно, конечное решение должно устанавливать только период выемки блоков для того, чтобы исключить неприемлемую комбинацию тип сырья — схема обогащения. Месторождение делят на четыре геотехнические зоны с соответствующим определением угла наклона уступа (рис. 5): 33, 35, 41 и 35°, для зон 1, 2, 3, 4 соответственно.

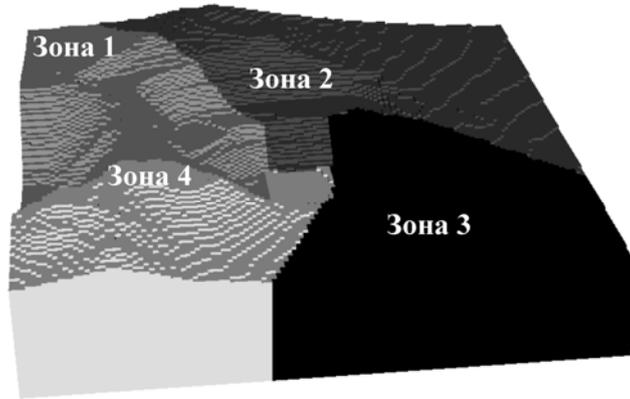


Рис. 5. Геотехнические зоны месторождения

СОЗДАНИЕ ИСХОДНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВЫЕМКИ. В [18] показано, что использование более 15–20 моделей не оказывает существенного влияния на качество стохастического решения. Получено 15 вариантов последовательности выемки на основе имеющихся моделей, технической и финансовой информации. Робастность стохастического решения верифицирована путем анализа рисков на основании различных систем моделей [2, 24]. Последовательность выемки получена с помощью алгоритма Милава и программы Whittle [25]. Алгоритм аппроксимирует максимум NPV на основе комбинации моделей уступов и вложенных карьеров. В программе Whittle это осуществляется алгоритмом Лерча–Гроссмана.

На рис. 6 показан контур карьера на 12-м году эксплуатации месторождения — часть четырех вариантов последовательности выемки, разработанных на основе моделей рудного тела. Очевидно, что разные модели рудного тела дают разную последовательность выемки, контуры карьера на 12-м году эксплуатации также отличаются друг от друга. Даже число лет в последовательности выемки колеблется в пределах 45–50, и только первые 15 лет рассматриваются путем сравнения результатов целенаправленного производства и кумулятивного NPV и представляют более 80 % суммарной NPV проекта.

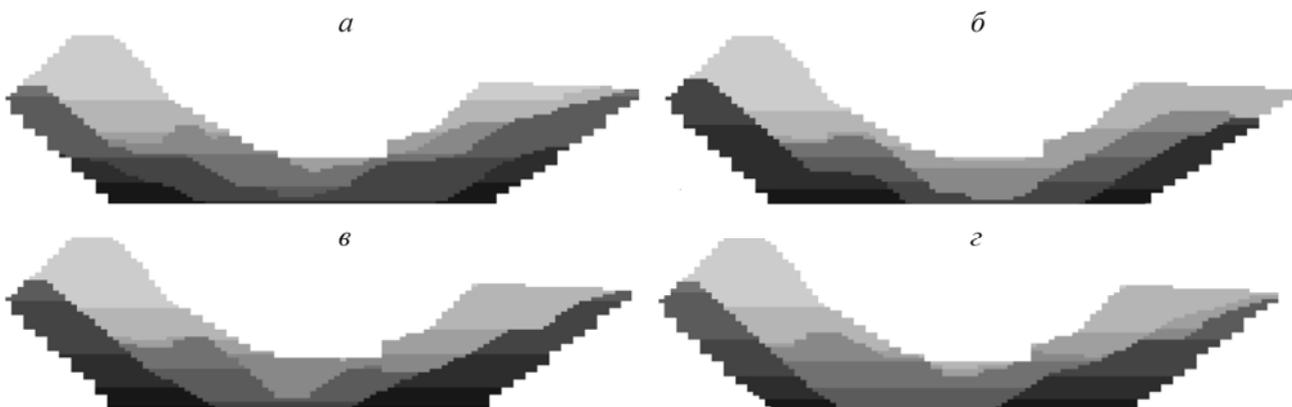


Рис. 6. Поперечное сечение. Последовательность выемки: а — № 1; б — № 6; в — № 10; г — № 15

ВЫБОР НАЧАЛЬНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВЫЕМКИ. Первая стадия применения “имитации отжига” — это выбор исходной последовательности выемки. Анализ производственного риска выполняется для каждой такой последовательности. На рис. 7 показана прогнозируемая производительность цикла измельчения для 15 вариантов последовательности выемки, разработанных на основе моделей рудного тела.

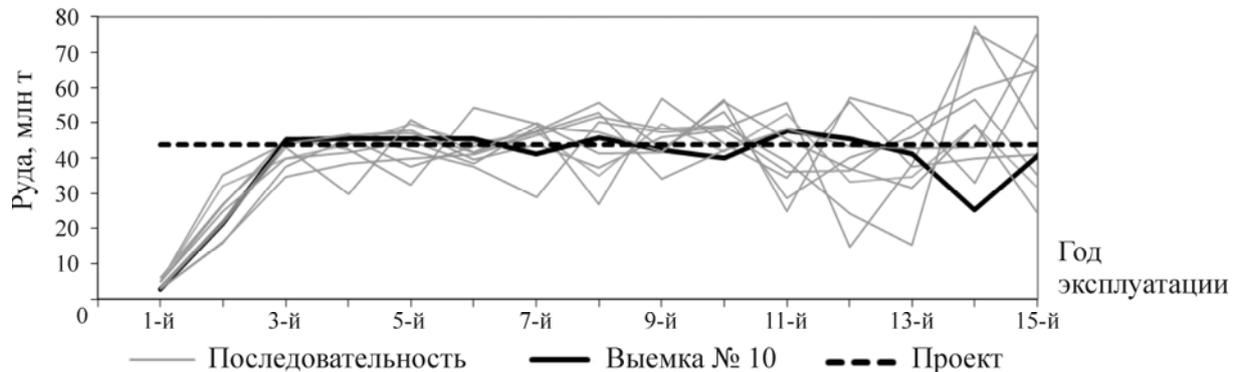


Рис. 7. Прогнозируемый объем руды, направленной в цикл измельчения, согласно начальной последовательности выемки

Прогнозируемый объем руды, направленной для измельчения, колеблется в большей степени в поздние периоды в связи с увеличением числа подготовленных к выемке блоков при последовательности выемки. В период между 3-м и 15-м годами прогнозируемое отклонение последовательности выемки № 10 составит в среднем 8.1 % от проектного значения. Это наименьшее прогнозируемое отклонение среди вариантов последовательности выемки. На рис. 8 показана последовательность выемки, когда материал отсортировывается в отвал в течение первых 15 лет эксплуатации месторождения. В течение первых двух лет производство пустой породы превышало проектный уровень при меньшем объеме сырья, поставляемого в цикл измельчения. В период 3–15 лет эксплуатации прогнозируемое отклонение варианта последовательности выемки № 10 составляло в среднем 7 % относительно проектного уровня производства породы. Эти отклонения оказались ниже прогнозируемых для других вариантов исходной последовательности выемки.

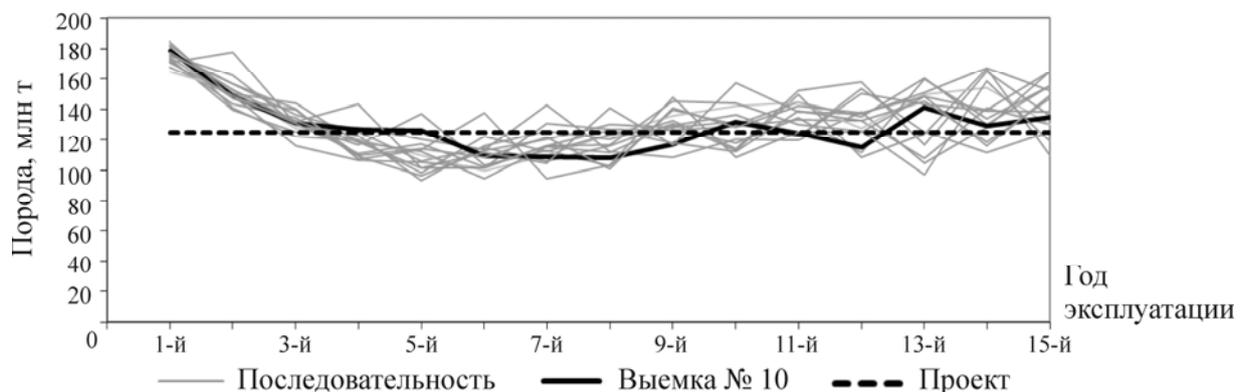


Рис. 8. Прогнозируемый объем породы, направляемой в отвал, согласно исходной последовательности выемки

Критерии отбора варианта начальной последовательности выемки субъективны. Лучшей начальной последовательностью может быть та, в которой уровень производства близок к проектному уровню, или та, которая приводит к получению максимального прогнозируемого NPV,

или та, отбор которой может быть произведен произвольно. Прогноз минимальных отклонений от проектного уровня производства руды и породы позволил выбрать вариант последовательности выемки № 10 как исходный. Использование этого критерия приводит к сокращению количества рассматриваемых вариантов последовательности выемки и, следовательно, сокращению времени расчета для получения оптимального решения.

СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ПЛАН РАБОТЫ РУДНИКА. Выбор исходной последовательности выемки позволяет применить алгоритм “имитации отжига”. Параметры, выбранные для контроля алгоритма, должны гарантировать значительное число перестановок для достижения удовлетворительной коррекции начального решения в течение оптимального времени. Экспериментально установленные параметры “имитации отжига” представлены ниже:

Максимальное число перестановок	1.0e+11
Низкое значение целевой функции (конвергенция)	1.0e+6
Начальная температура, °С	0.00001
Снижающий коэффициент	0.1
Максимальное число возмущений при данной температуре	85000
Максимальное число возмущений без изменения	1.0e+10

На рис. 9 показана работа цикла измельчения в стохастическом производственном плане рудника, полученном с использованием “имитации отжига”. В период 3–15 лет прогнозируемое отклонение от проектной производительности цикла составило 3.9 %. Максимальное отклонение прогнозируется на 14-й год.

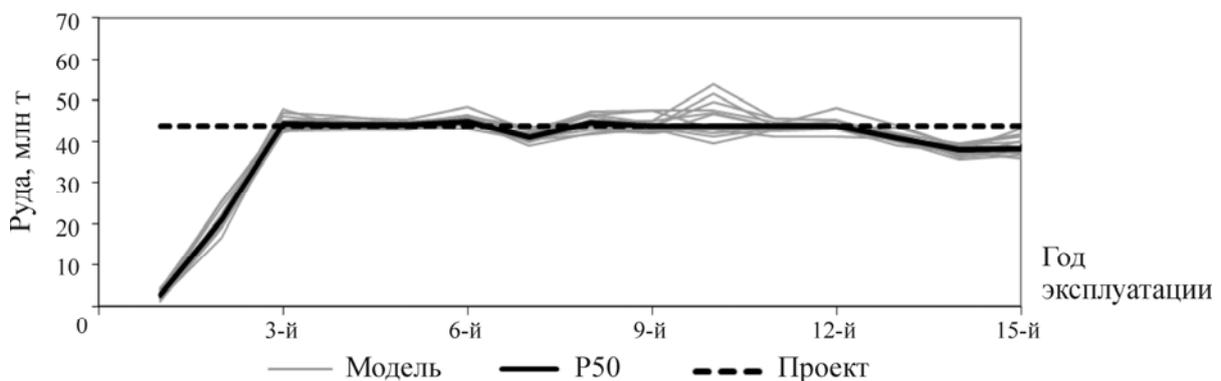


Рис. 9. Объем руды, поступающей в цикл измельчения, в стохастическом производственном плане рудника

На рис. 10 представлен цикл биовыщелачивания в стохастическом производственном плане рудника. Прогнозируемый максимум производительности биовыщелачивания 12.8 млн т приходится на 8-й год эксплуатации.

На рис. 11 приведен цикл кислотного выщелачивания оксидного материала в стохастическом производственном плане работы рудника. Производительность цикла возрастает в период со 2-го по 6-й год эксплуатации месторождения и снижается начиная с 7-го по 12-й год в связи с истощением запасов оксидных материалов.

На рис. 12 показан объем породы, отправленной в отвал, в стохастическом производственном плане работы рудника. Прогнозируемое отклонение от проектного уровня составляет в среднем 4.5 % в период с 3-го по 15-й годы эксплуатации месторождения.

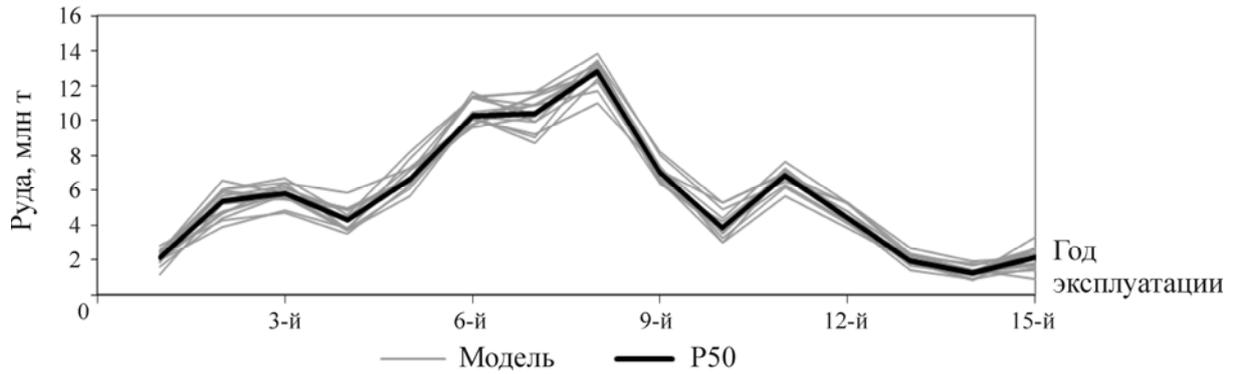


Рис. 10. Объем руды, поступающей в цикл биовыщелачивания, в стохастическом производственном плане рудника

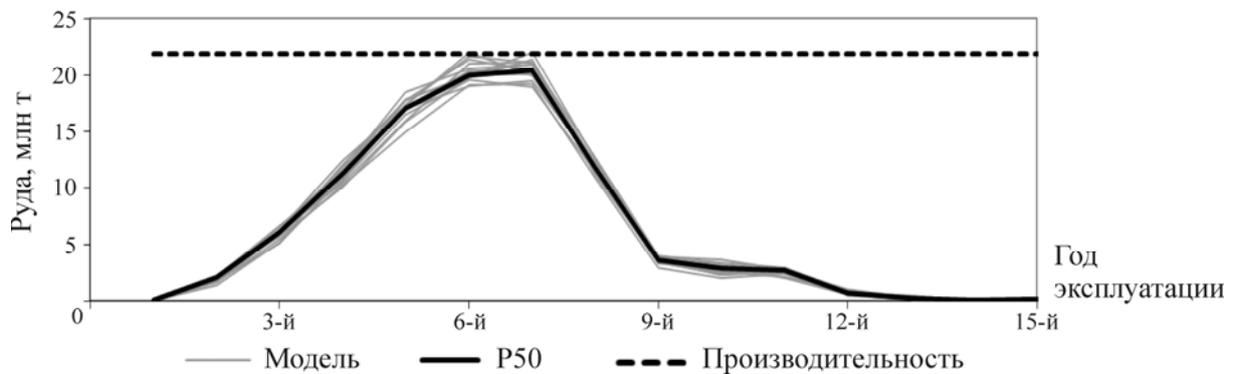


Рис. 11. Объем руды, направляемой в цикл кислотного выщелачивания, в стохастическом производственном плане рудника

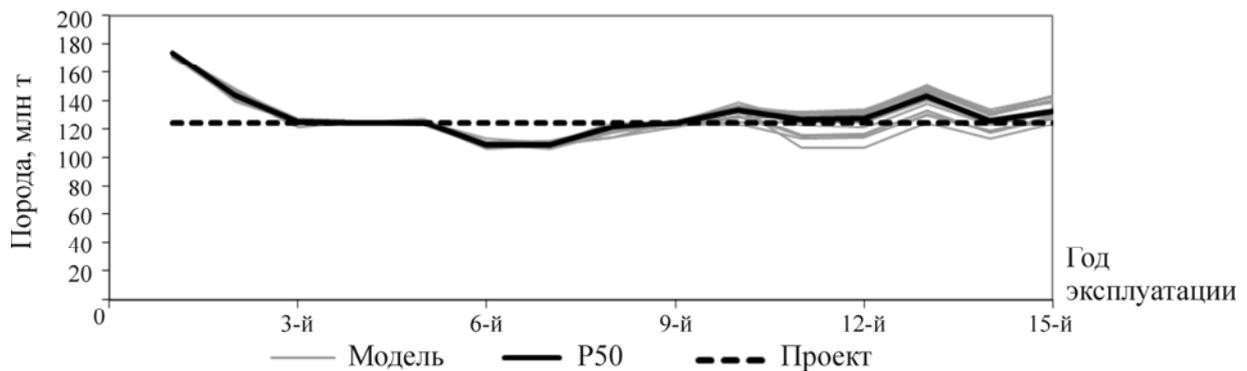


Рис. 12. Объем породы, направляемой в отвал, в стохастическом производственном плане рудника

На рис. 13 представлено производство меди в стохастическом плане: высокие показатели отмечены в ранние периоды благодаря дисконтированию (8 %). Максимальное производство прогнозируется на 5-й год эксплуатации месторождения. На рис. 14 отражен кумулятивный NPV в стохастическом плане в течение первых 15 лет.

Кумулятивный NPV в течение первых 15 лет имеет незначительные колебания по сравнению с промежуточной последовательностью при применении алгоритма “имитации отжига”. Однако преимущества этого алгоритма очевидны для достижения специфических производственных целей без учета соответствующей стоимости незадействованных мощностей при расчете NPV.

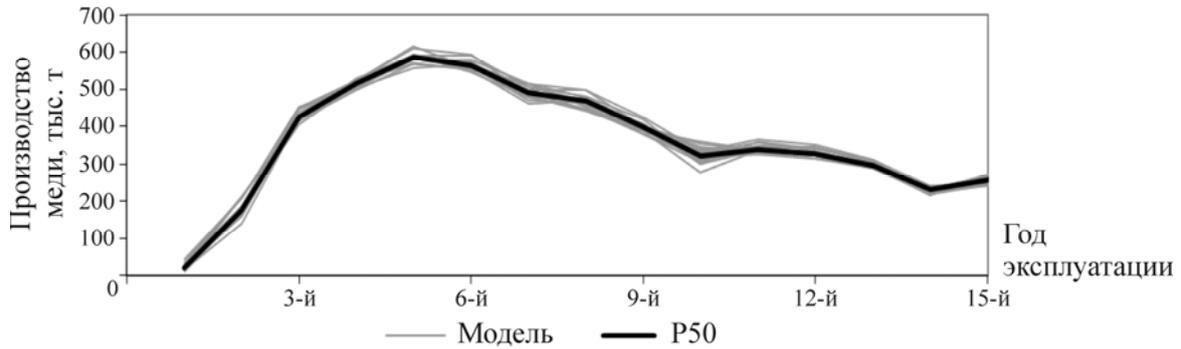


Рис. 13. Производство меди согласно стохастическому производственному плану рудника

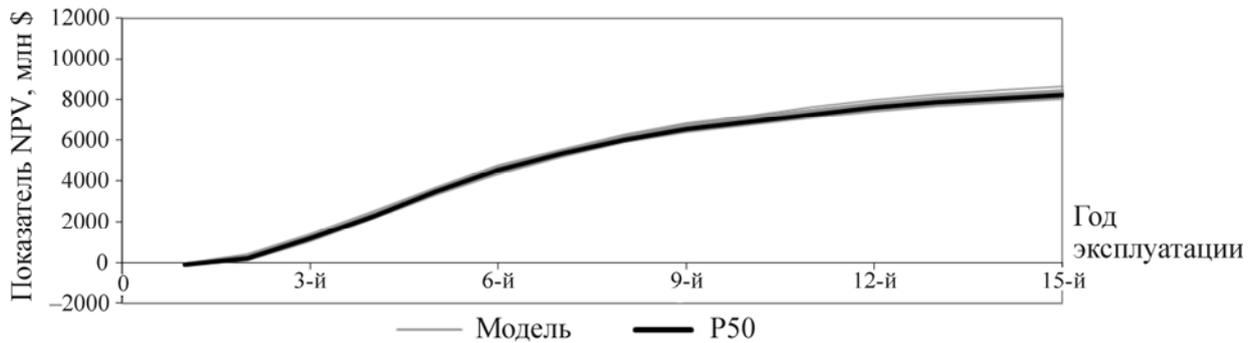


Рис. 14. Кумулятивный NPV согласно стохастическому производственному плану рудника

Результаты анализа риска в стохастическом производственном плане обобщены в табл. 2. Вероятность стохастического производственного плана рудника составляет 90 % со средним отклонением менее 8.5 и 8.4 % для цикла измельчения и отвалов с кумулятивным NPV более \$8.11 млрд в течение 15 лет эксплуатации.

ТАБЛИЦА 2. Стохастический план

Показатель	P10	P50	P90
Среднее отклонение от проектных данных в цикле измельчения, %	1.6	4.6	8.5
Среднее отклонение от проектных данных для объема пустой породы, %	2.8	5.7	8.4
Средняя производительность цикла биовыщелачивания, млн т	5.1	5.7	6.4
Средняя производительность цикла кислотного выщелачивания, млн т	8.3	8.9	9.5
Кумулятивный NPV, \$ млрд	8.11	8.24	8.45

РОБАСТНОСТЬ СТОХАСТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ. При анализе рисков стохастического производственного планирования рудника рассмотрены модели, на основе которых разработаны варианты последовательности выемки. С целью верификации робастности плана выполнен анализ рисков 15 моделей рудного тела. На рис. 15 показан объем руды, поставляемой в цикл измельчения, био- и кислотного выщелачивания и в отвал, согласно стохастическому плану.

Прогнозируемое среднее отклонение в производительности цикла измельчения составляет 3.6 %, согласно данным нового анализа рисков, т. е. приблизительно такое же, как и обсуждавшееся выше значение этого показателя 3.9 %. Прогнозируемое среднее отклонение от планового производства породы составляет 4.7 % (4.5 % в предыдущем анализе рисков). На рис. 16 представлен кумулятивный показатель NPV, полученный в новом анализе рисков, с незначительной разницей приблизительно на 1.8 % с показателем предыдущего анализа. На основе прогнози-

руемых показателей производительности и значения кумулятивного NPV можно сделать заключение, что план, разработанный при исследовании 15 моделей рудного тела, является робастным относительно различных моделей рудного тела.

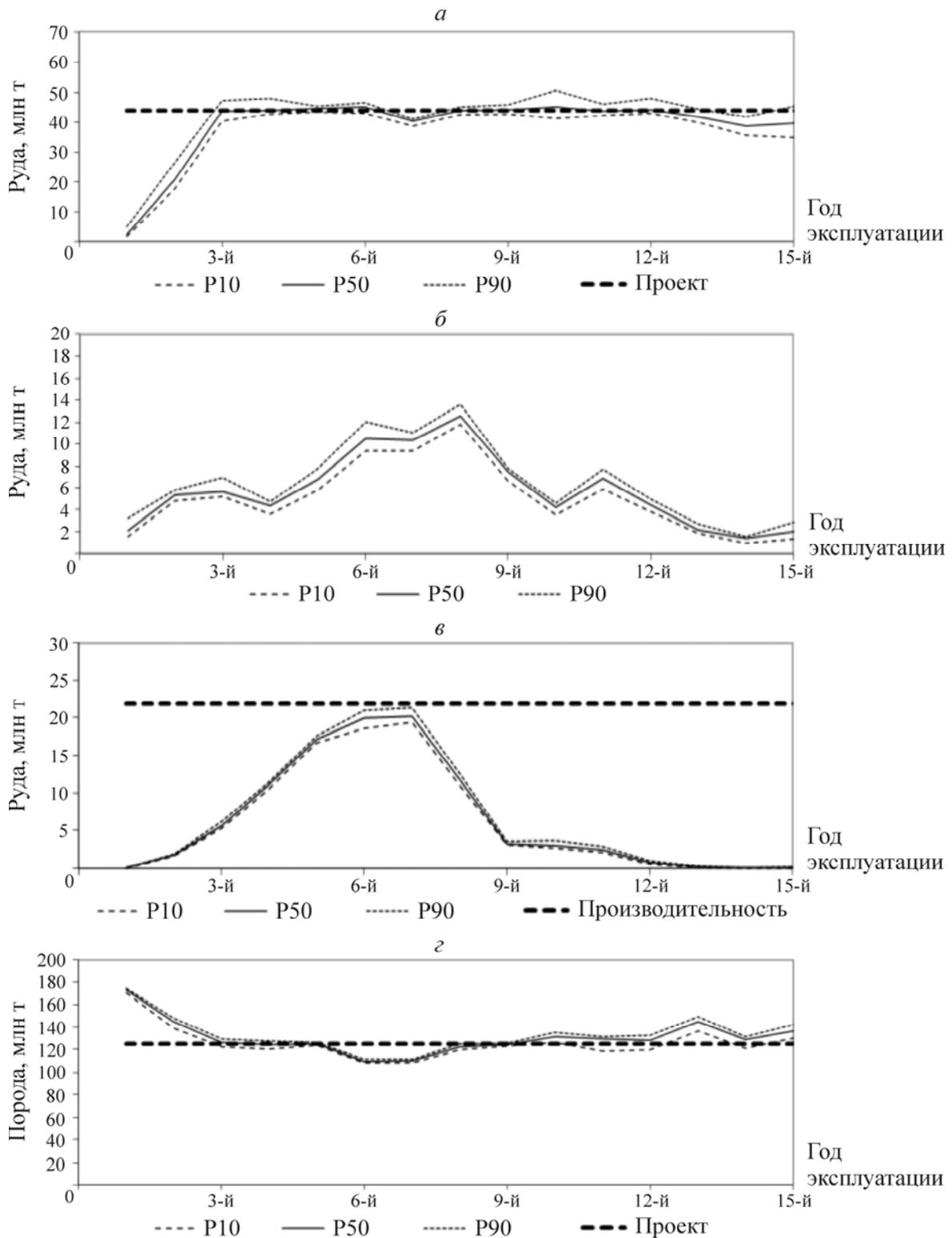


Рис. 15. Объем материала, поступающего в циклы обогащения и в отвал, согласно стохастическому производственному плану рудника: *а* — руда в цикл измельчения; *б* — руда на биовыщелачивание; *в* — руда на кислотное выщелачивание; *г* — порода в отвал

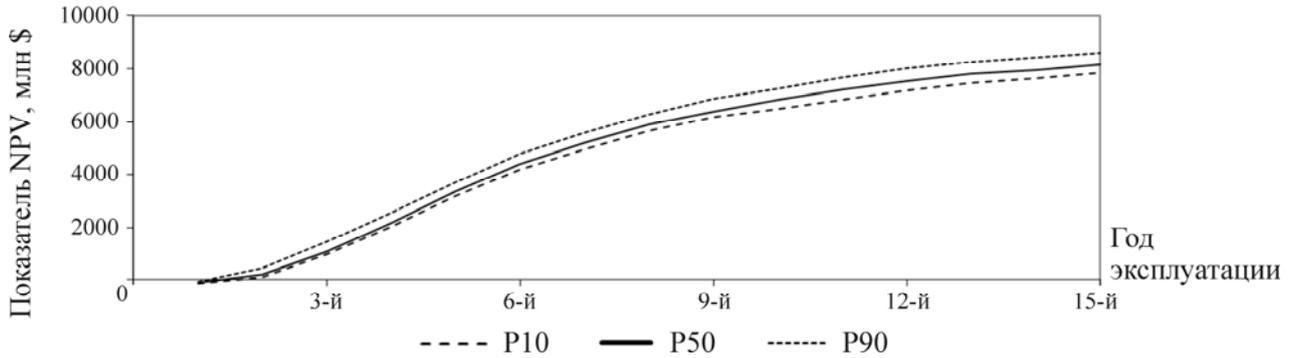


Рис. 16. Кумулятивный показатель NPV в стохастическом производственном плане рудника

СРАВНЕНИЕ С ТРАДИЦИОННЫМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПЛАНОМ РАБОТЫ РУДНИКА. Для качественной оценки преимуществ стохастического производственного плана проведено его сравнение с планом, разработанным по традиционной методике. Традиционный производственный план, рассматривающий три технологических процесса, разработан на основе показателей среднего качества для 50 имеющихся моделей рудного тела с помощью планирующего устройства Milawa и программы Whittle [25]. На рис. 17 приведены показатели цикла измельчения и производства породы в традиционном плане.

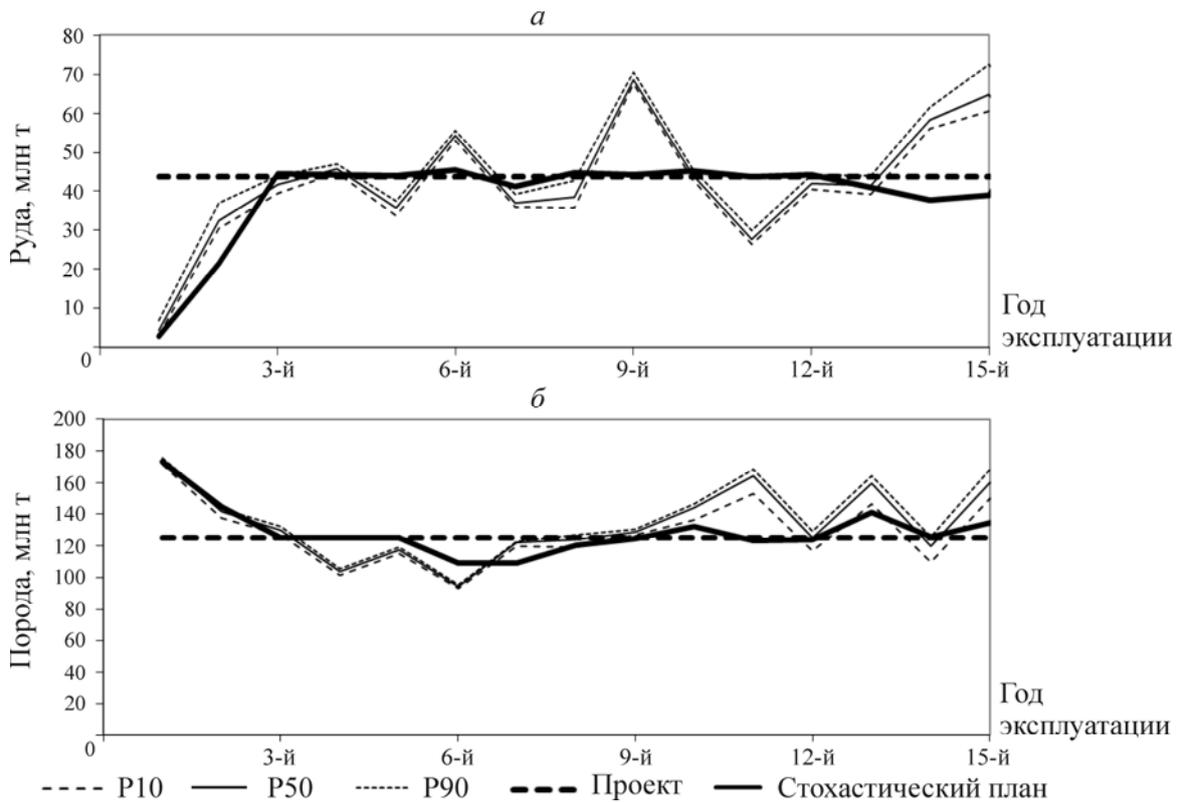


Рис. 17. Объем руды, поступающей в цикл измельчения (а) и отвал (б) в традиционном плане

Традиционный производственный план дает высокие нецелесообразные показатели производства руды и породы. На рис. 18 представлены показатели NPV в традиционном плане, составленном с помощью программы Whittle, и прогнозируемые в стохастическом плане. NPV стохастического плана на 4 % выше по сравнению с данными традиционного плана, однако за-

траты, связанные с простоем производственного оборудования, не включены в расчет NPV. Эти некорректные затраты имеют существенный вес в традиционном плане и снижают прогнозируемые значения NPV.

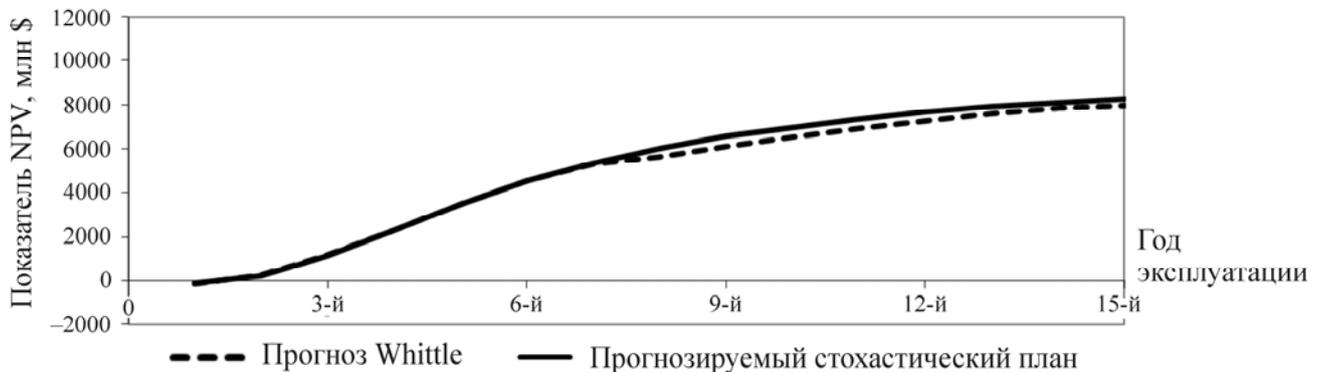


Рис. 18. Кумулятивные показатели NPV в традиционном производственном плане

ВЫВОДЫ

Предлагаемый метод позволяет контролировать отклонение от производственных целей на горно-обогатительном комплексе при добыче руд разных типов и использовании нескольких технологических потоков. Полученное решение зависит от неопределенности типов сырья в соответствующих блоках: если блоки представляют однородный тип материала в моделях рудного тела, то стохастический производственный план определяет периоды выемки и назначение сырья в блоке. В случае изменяющегося типа материала, в процессе моделирования полученное решение определяет только период выемки блока без указания схемы переработки сырья для того, чтобы исключить ошибочную технологическую схему. Поскольку выбор исходной последовательности выемки может повлиять на качество принимаемых решений в реальном времени, для выбора оптимальной последовательности выемки блоков рекомендован анализ чувствительности.

Применение этого метода планирования при эксплуатации медного месторождения дало прогнозируемое среднее отклонение менее 5 % от проектного для производства руды и отвального материала. Прогнозируемое среднее отклонение составляет приблизительно 20 % для цикла измельчения и 12 % для отвального материала в традиционном плане, разработанном на основе моделей рудного тела.

Для определения параметров «имитации отжига» выполнено несколько экспериментов по определению их надежных значений для выработки качественных решений с приемлемыми практически сроками расчетов. Однако документальное подтверждение изменения качества решения относительно параметров алгоритма позволит получить лучшую оценку оптимальных диапазонов значений этих параметров при решении проблем производственного планирования работы рудника. Несмотря на робастность стохастического производственного плана относительно различных моделей, включая 15 исходных последовательностей выемки, желательно выполнить анализ чувствительности для большего ряда исходных последовательностей. Необходимы дополнительные исследования по расширению области применения метода для горно-обогатительных комплексов с многочисленными источниками сырья (открытые рудники) и складами добытого сырья.

Выражаем особую благодарность компаниям Brian Baird, BHP Billiton за поддержку, сотрудничество и технические комментарии по практическому применению предлагаемого метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dimitrakopoulos R., Farrelly C., and Godoy M.** Moving forward from traditional optimization: Grade uncertainty and risk effects in open pit mine design, Transactions of the IMM, Section A Mining Industry, **111** (2002).
2. **Ravenscroft P.** Risk analysis for mine scheduling by conditional simulation, IMM Transactions, Mining Technology, **101** (1992).
3. **Dowd P.** Risk in mineral projects: Analysis, perception and management, IMM Transactions, Mining Industry, **106** (1997).
4. **Godoy M.** The effective management of geological risk in long-term production scheduling of open pit mines, PhD thesis, University of Queensland, Brisbane, Australia, 2003.
5. **Dimitrakopoulos R.** Stochastic optimization for strategic mine planning: a decade of developments, Journal of Mining Science, **47** (2011).
6. **Ramazan S. and Dimitrakopoulos R.** Production scheduling with uncertain supply: a new solution to the open pit mining problem, Optimization and Engineering, DOI 10.1007/s11081-012-9186-2 (2012).
7. **Leite A. and Dimitrakopoulos R.** Production scheduling under metal uncertainty — Application of stochastic mathematical programming at an open pit copper mine and comparison to conventional scheduling, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Spectrum Series, **17** (2010).
8. **Albor F. and Dimitrakopoulos R.** Algorithmic approach to pushback design based on stochastic programming: method, application and comparisons, IMM Transactions, Mining Technology, **119** (2010).
9. **Menabde M., Froyland G., Stone P., and Yeates G.** Mining schedule optimization for conditionally simulated orebodies, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Spectrum Series, **14** (2007).
10. **Meagher C., Abdel Sabour S. A., and Dimitrakopoulos R.** Pushback design of open pit mines under geological and market uncertainties, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Spectrum Series, **17** (2010).
11. **Asad M. W. A. and Dimitrakopoulos R.** Implementing a parametric maximum flow algorithm for optimal open pit mine design under uncertain supply and demand, Journal of the Operational Research Society, doi:10.1057/jors.2012.26 (2012).
12. **Lamghari A. and Dimitrakopoulos R.** A diversified Tabu search approach for the open-pit mine production scheduling problem with metal uncertainty, European Journal of Operational Research, **222** (2012).
13. **Godoy M. and Dimitrakopoulos R.** Managing risk and waste mining in long-term production scheduling, SME Transactions, **316** (2004).
14. **Metropolis N., Rosenbluth A., Rosenbluth N., Teller A., and Teller E.** Equation of State Calculations by Fast Computing Machines, The Journal of Chemical Physics, **21** (1953).
15. **Kirkpatrick S., Gellat C., and Vecchi M.** Optimization by simulated annealing, Science, **220** (1983).
16. **Geman S. and Geman D.** Stochastic relaxation, Gibbs distribution and the Bayesian restoration of images, IEEE Trans., On Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-6 (1984).
17. **Leite A. and Dimitrakopoulos R.** Stochastic optimization model for open pit mine planning: application and risk analysis at a copper deposit, IMM Transactions, Mining Technology, **116** (2007).
18. **Albor F. and Dimitrakopoulos R.** Stochastic mine design optimization based on simulated annealing: Pit limits, production schedules, multiple orebody scenarios and sensitivity analysis, IMM Transactions, Mining Technology, **118** (2009).

19. **Whittle J.** The Global Optimizer Works — What Next? The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Spectrum Series, 17 (2010).
20. **Goodfellow R. and Dimitrakopoulos R.** Algorithmic integration of geological uncertainty in pushback designs for complex multiprocess open pit mines, IMM Transactions, Mining Technology, **122** (2013).
21. **Goovaerts P.** Geostatistics for Natural Resources Evaluation, Oxford University Press, 1997.
22. **Rondon O.** Teaching aid: minimum/maximum autocorrelation factors for joint simulation of attributes, Mathematical Geosciences, **44** (2012).
23. **Zhang T., Pedersen S. I., Ch. Knudby, and D. McCormick.** Memory-Efficient Categorical Multi-point Statistics Algorithms Based on Compact Search Trees, Mathematical Geosciences, **44** (2012).
24. **Godoy M. and Dimitrakopoulos R.** A risk analysis based framework for strategic mine planning and design — Method and application, Journal of Mining Science, **47** (2011).
25. **Whittle J.** A decade of open pit mine planning and optimization — the craft of turning algorithms into packages, in: APCOM'99 Computer Applications in the Minerals Industries 28-th International Symposium, Colorado School of Mines, Golden, 1999.

Поступила в редакцию 27/II 2013