

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.33.013.3

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТНОЙ МОЩНОСТИ ЗОЛОТОРУДНОГО КАРЬЕРА НА ОСНОВЕ ЛАГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. А. Ордин¹⁻³, И. В. Васильев⁴

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,

E-mail: ordin@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²Федеральный исследовательский центр информационно-вычислительных технологий,
просп. Академика Лаврентьева, 6, 630090, г. Новосибирск, Россия

³ООО “Научно-проектный центр ВостНИИ”, ул. Институтская, 1, 650002, г. Кемерово, Россия

⁴ООО “Сибгипрошахт”, ул. 1905 года, 23, 630132, г. Новосибирск, Россия

Изложены основные теоретические положения задачи лагового моделирования при оптимизации проектной мощности золоторудного карьера по условию максимума интегральных экономических показателей за период отработки месторождения. Приведены горно-геологические сведения золоторудного месторождения “Брекчия” Алтайского края и проектные решения по его отработке открытым способом. Показаны результаты решения задачи оптимизации его проектной мощности по условию максимума интегральных экономических показателей с учетом лагового моделирования. Выполнен анализ влияния рыночных цен на золото на оптимальную проектную мощность карьера.

Карьер, руда, балансовые запасы, золото, лаговое моделирование, оптимизация, проектная мощность, дисконтирование, интегральные критерии

DOI: 10.15372/FTPRPI20210208

Вопросам оптимизации производственной мощности и границ карьеров, календарного плана отработки месторождений полезных ископаемых, глубины перехода от открытых горных работ к подземным посвящено большое количество публикаций в России и за рубежом [1–24]. Для решения этих задач предлагаются различные методы и алгоритмы, например Лерча–Гроссмана [1] с использованием теории графов, линейного, целочисленного и динамического программирования [2–4], ветвей и границ [5]. Применяются также разнообразные критерии оптимальности задач: предельный коэффициент вскрыши [17–19], минимальные дисконтированные эксплуатационные и капитальные затраты [17], максимальная прибыль [5], чистый дисконтированный доход [20–22] и др. При проектировании шахт и карьеров широкое распространение получили программные комплексы, разработанные, главным образом, в Австралии и Канаде: Datamine, Gemcom, Micromine, Mincom. Mintec, Mine2-4D, Minemax, Runge, Surpac Vision, Vulcan, Whittle [23].

Тем не менее применяемые в настоящее время отечественные методики для решения перечисленных проектных задач часто используют устаревшие подходы, неадекватные математические модели и зависимости, отраслевые инструкции, которые требуют переработки и обнов-

ления. Так, в [17] предлагается рассчитывать граничный коэффициент вскрыши с учетом средневзвешенного коэффициента дисконтирования вскрышных работ, при этом себестоимости подземных, открытых и вскрышных работ принимаются в статике, без учета их изменения во времени. В [18] определяется минимальный срок существования алмазородного карьера по формуле $T = 0.24\sqrt[4]{Q}$, где Q — балансовые запасы руды, т. Однако авторы не делают ссылку на источник этой формулы. На самом деле формула принадлежит американскому исследователю Тейлору, который на основе статистического анализа проектов рудников в США предложил в 1977 г. для расчета проектной мощности рудника и его срока службы формулы [21, 24]

$$A = 5\sqrt[4]{Q^3} \text{ и } T = \frac{Q}{A} = 0.24\sqrt[4]{Q}. \quad (1)$$

На наш взгляд, формула (1) Тейлора неприемлема для расчета производственной мощности карьеров в России, так как получена статистическим путем для американских рудников почти 50 лет назад и не учитывает многочисленные геологические, технологические и экономические факторы.

В качестве критерия оценки транспортных расходов горной массы по уклонам используется минимум дисконтированных затрат за весь срок отработки месторождения, но в формуле отсутствует норма дисконта для приведения будущих затрат во времени [19].

Производственную мощность разреза предлагается определять делением промышленных запасов угля на срок амортизации основных фондов [20]. Это приведет к завышенным значениям производственной мощности разреза, поскольку фактический срок службы горнодобывающего предприятия, как правило, всегда превышает срок амортизации основных фондов. Приведенное определение производственной мощности горнодобывающего предприятия является некорректным еще и потому, что срок службы предприятия варьирует в большом диапазоне (от 5 до 50 лет и более) и, соответственно, в широком диапазоне значений находится и его производственная мощность. Также здесь совершенно упускается вопрос об оптимальной производственной мощности по тем или иным критериям.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В ИГД СО РАН разработана методика оптимизации проектной мощности горнодобывающего предприятия на основе лагового моделирования по условию максимума интегральных экономических показателей — валовой дисконтированной выручки $P(A)$, валовой дисконтированной прибыли $V(A)$, чистого дисконтированного дохода $NPV(A)$ [21–24]:

$$P(A) = \sum_{t=T^c(A)+1}^{T^c(A)+\frac{Q}{A}} \frac{sA}{(1+E)^t} = \frac{sA}{E} \left((1+E)^{-T^c(A)} - (1+E)^{-(T^c(A)+\frac{Q}{A})} \right) \rightarrow \max, \quad (2)$$

$$V(A) = \sum_{t=T^c(A)+1}^{T^c(A)+\frac{Q}{A}} \frac{(s - (c_0 + \frac{c_1}{A}))A}{(1+E)^t} = \frac{(s - c_0)A - c_1}{E} \left((1+E)^{-T^c(A)} - (1+E)^{-(T^c(A)+\frac{Q}{A})} \right) \rightarrow \max, \quad (3)$$

$$NPV(A) = \sum_{t=T^c(A)+1}^{T^c(A)+\frac{Q}{A}} \frac{(s - (c_0 + \frac{c_1}{A}))A}{(1+E)^t} - \sum_{t=1}^{T^c(A)} \frac{(K + k_0 A_1)}{T^c(A)} (1+E)^t = \frac{(s - c_0)A - c_1}{E} \left((1+E)^{-T^c(A)} - (1+E)^{-(T^c(A)+\frac{Q}{A})} \right) - \frac{(K + k_0 A)}{ET^c(A)} \left((1+E)^{T^c(A)} - 1 \right) \rightarrow \max, \quad (4)$$

где $T^c(A) = T_0 + \tau A$ — строительный лаг, учитывающий линейную зависимость от проектной мощности срока строительства горнодобывающего предприятия, лет; T_0 — период строительства, не зависящий от мощности предприятия, лет; τ — период строительства предприятия единичной мощности, лет²/млн т; Q — промышленные запасы полезного ископаемого, т; s — рыночная цена полезного ископаемого, руб./т; c_0, c_1 — условно-постоянная и условно-переменная части гиперболической функции себестоимости добычи полезного ископаемого; K, k_0 — условно-постоянная и условно-переменная части линейной функции капиталовложений на строительство предприятия; E — норма дисконта.

Отличие критериев (2)–(4) от принятых и используемых в отрасли экономических показателей эффективности инвестиций [26] заключается в том, что в них учитывается экономический ущерб от замораживания капиталовложений в период строительства предприятия. С этой целью в (2)–(4) введен строительный лаг в виде линейной функции от проектной мощности предприятия. Как показано в [21–23], приведенные интегральные лаговые функции (2)–(4) имеют точки максимума в зависимости от проектной мощности предприятия, которые определяются численными методами.

Аналитическое решение задачи оптимизации проектной мощности горнодобывающего предприятия существует при постоянном горизонте расчета ($T = \text{const}$) только для критерия интегральной дисконтированной выручки (2) при дифференцировании этой функции и решения уравнения

$$\frac{\partial P(A)}{\partial A} = \frac{s(1 - \tau A \ln(1 + E))(1 - (1 + E)^{-T})}{E(1 + E)^{(T_0 + \tau A)}} = 0, \quad (5)$$

откуда оптимальная проектная мощность предприятия:

$$A_o = \frac{1}{\tau \ln(1 + E)}. \quad (6)$$

Как показано в [21, 23], зависимость оптимальной по критерию (2) проектной мощности A горнодобывающего предприятия от запасов Q полезного ископаемого имеет гиперболический асимптотический характер (рис. 1):

$$A_{opt}(Q) \approx \frac{1}{\tau \ln(1 + E)} - \frac{1}{aQ + \tau \ln(1 + E)}. \quad (7)$$

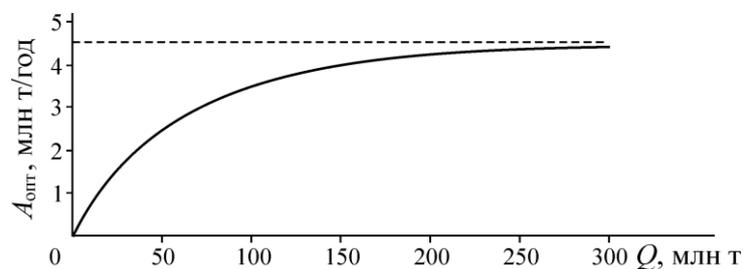


Рис. 1. Асимптотическая зависимость оптимальной проектной мощности карьера от запасов полезного ископаемого

Анализ формулы (7) показывает, что при бесконечных запасах ($Q \rightarrow \infty$) полезного ископаемого оптимальная проектная мощность предприятия имеет конечное значение, совпадающее с решением (5). В этом заключается существенное отличие от формулы Тейлора (1), со-

гласно которой при бесконечных запасах полезного ископаемого проектная мощность также равна бесконечности. По этой же причине неприемлема формула П. З. Звягина, по которой мощность шахты пропорциональна корню квадратному от запасов угля.

Поставим эту задачу применительно к оптимизации проектной мощности золоторудного карьера “Брекчия”.

КАРЬЕР “БРЕКЧИЯ”

Месторождение “Брекчия” расположено на абсолютных высотах 700–800 м на относительно пологом склоне в центральной части Чуринской золоторудной площади Алтайского края в левобережье р. Чурия. В плане тело брекчий имеет эллипсовидную форму с длинной осью, вытянутой в широтном направлении. Размер тела составляет 200 × 300 м, брекчии не имеют четких контактов. Минеральный состав руд относительно прост: преобладают породообразующие минералы (94.4%), главными из которых являются кварц (29%) и ортоклаз (23%). Количество плагиоклаза 10%, остальная часть породы (32.4%) состоит из глинисто-гидролюдистых минералов: каолинита, гидрослюд, хлорита.

На месторождении выделено 21 рудное тело. Каждое рудное тело соответствует подсчетному блоку. Из 21 блока 14 относятся к категории С1, остальные — к категории С2. Четырнадцать подсчетных блоков являются балансовыми запасами, семь рудных тел разделены границами открытых горных работ на балансовые и забалансовые. Остальные более мелкие блоки располагаются в основном за пределами проектного контура карьера и относятся к забалансовым запасам (рис. 2). Из всех оконтуренных рудных залежей можно отметить семь основных рудных тел, в которых заключено 68% всех запасов руды и 75% запасов золота.

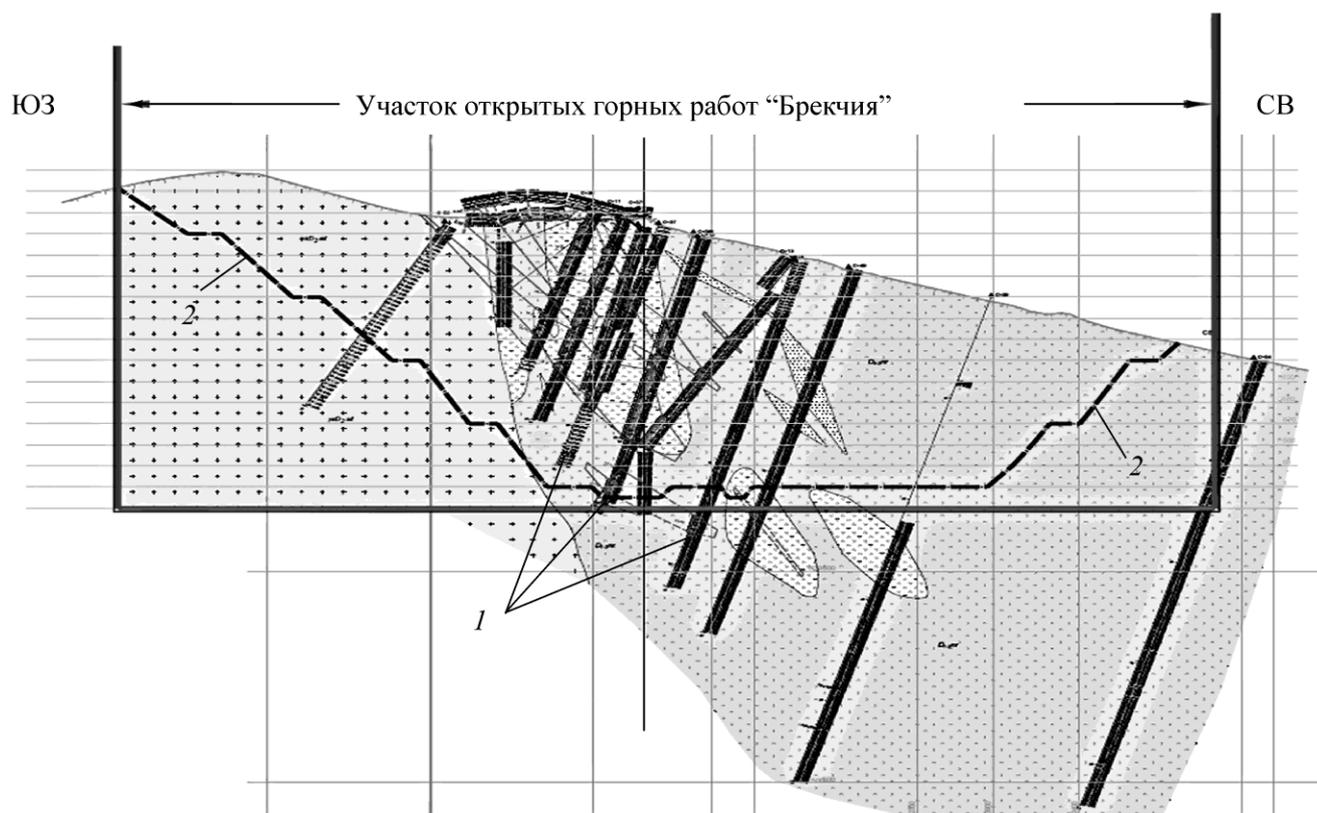


Рис. 2. Золоторудное месторождение “Брекчия” и проектные границы карьера: 1 — рудные тела; 2 — проектные границы карьера

Внутреннее строение рудных тел обусловлено чередованием оруденелых золотоносных и слабозолотоносных участков различной мощности и сложной морфологии. Оруденение прерывистое, рудные зоны не имеют четких геологических границ. Любая скважина или канава может включать несколько рудных интервалов, разобщенных безрудными прослоями. Характеристика рудных тел месторождения “Брекчия” показывает, что они отличаются разнообразием морфологических форм, масштабами и глубиной залегания при различном качестве руд, что определяет отнесение их к 3-й группе по сложности геологического строения.

Золоторудные тела участка открытых горных работ локализованы в зоне шириной 100 м и протяженностью более 200 м субширотного простирания и крутого ($60-90^\circ$) падения. Протяженность рудных тел изменяется от 70 до 218 м, горизонтальная мощность составляет 0.91 – 13.3 м.

Основные исходные данные для решения поставленной задачи:

Балансовые запасы руды, тыс. т	
категории C_1	649.90
категории C_2	409.60
категорий C_1 и C_2	1059.50
Проектная мощность карьера, тыс. т/год	280.00
Срок строительства карьера, лет	0.50
Удельный срок строительства карьера, лет/(млн т · год)	1.79
Срок отработки запасов руды, лет	4.50
Цена золота, руб./г	
в 2020 г.	2650.00
в 2021 г.	4500.00
Норма дисконта	0.10
Себестоимость добычи руды, руб./т	3137.00
условно-постоянная часть себестоимости c_0 , руб./т	1500.00
условно-переменная часть себестоимости c_1 , руб./млн т	458.36
Инвестиции на строительство карьера и обогатительной фабрики, млн руб.	1396.00
условно-постоянная часть инвестиций K , млн руб.	700.00
условно-переменная часть инвестиций k_0 , руб./т	2485.70

Решение задачи оптимизации проектной мощности карьера осуществлялось численным методом по трем критериям оптимальности (2)–(4) с учетом изменения цены золота в 2021 г.

В табл. 1 приведены результаты решения поставленной задачи по условию максимума интегральной дисконтированной выручки с учетом указанных категорий балансовых запасов руды и различных цен на золото. Как следует из табл. 1, оптимальная проектная мощность карьера при цене на золото 2650 руб./г составляет 280–400 тыс. т/год для балансовых запасов руды категории C_1 и 400–500 тыс. т/год для балансовых запасов руды категорий C_1 и C_2 . При увеличении цены на золото с 2650 до 4500 руб./г оптимальная проектная мощность карьера возрастает: 400–500 тыс. т/год для балансовых запасов руды категории C_1 и 500–600 тыс. т/год для балансовых запасов руды категорий C_1 и C_2 (рис. 3а).

Расчет оптимальной проектной мощности карьера “Брекчия” по критерию максимальной интегральной дисконтированной прибыли (3) выполнен с учетом гравитационно-флотационной схемы обогащения руды, различных категорий запасов и цен на золото (табл. 2).

ТАБЛИЦА 1. Результаты оптимизации проектной мощности карьера “Брекчия” по условию максимума интегральной дисконтированной выручки, млн руб.

Проектная мощность карьера, тыс. т /год	Балансовые запасы руды по категориям, тыс. т	
	649.9 (C_1)	1059.9 (C_1 и C_2)
Цена золота 2650 руб./г		
100	2579	3840
200	2654	4050
280	2685	4177
400	2680	4208
500	2662	4205
600	2636	4183
700	2606	4148
800	2573	4107
900	2538	4060
1000	2579	3840
Цена золота 4500 руб./г		
100	3861	5317
200	4379	6520
280	4507	6877
400	4560	7094
500	4551	7145
600	4520	7140
700	4476	7103
800	4425	7045
900	4369	6973
1000	4310	6894

Как видно из табл. 2, оптимальная проектная мощность карьера при цене на золото 2650 руб./г составляет 1000–1100 тыс. т/год (рис. 3б) и практически не зависит от балансовых запасов руды. При увеличении цены на золото с 2650 до 4500 руб./г оптимальная проектная мощность карьера незначительно снижается: 700–800 тыс. т/год для балансовых запасов руды категории C_1 и 800–900 тыс. т/год для балансовых запасов руды категорий C_1 и C_2 .

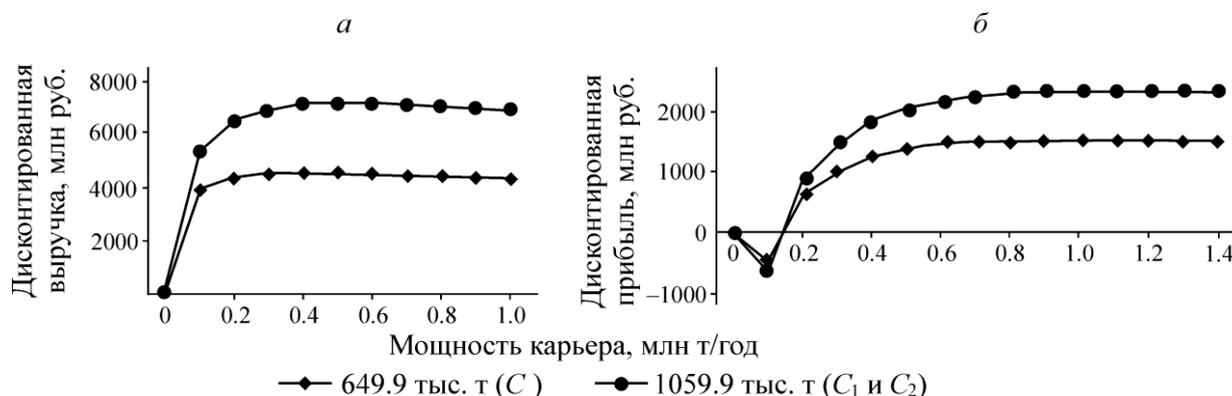


Рис. 3. Зависимость интегральной дисконтированной выручки (а) и прибыли (б) от мощности карьера “Брекчия” и балансовых запасов руды при цене золота 4500 (а) и 2500 руб./г (б)

ТАБЛИЦА 2. Результаты оптимизации проектной мощности карьера “Брекчия” по условию максимума интегральной дисконтированной прибыли, млн руб.

Проектная мощность карьера, тыс. т /год	Балансовые запасы руды по категориям, тыс. т	
	649.9 (C ₁)	1059.9 (C ₁ и C ₂)
	Цена золота 2650 руб./г	
100	– 488	– 649
200	626	892
280	992	1441
400	1267	1872
500	1387	2066
600	1458	2184
700	1502	2257
800	1527	2302
900	1540	2327
1000	1545	2339
1100	1544	2341
1200	1539	2335
	Цена золота 4500 руб./г	
100	1099	1463
200	2427	3454
280	2844	4135
400	3141	4642
500	3258	4852
600	3316	4966
700	3342	5023
800	3346	5044
900	3336	5040
1000	3317	5020

Расчет оптимальной проектной мощности карьера “Брекчия” по наиболее общему критерию максимума чистого дисконтированного дохода (4) выполнен с учетом строительства карьера и обогатительной фабрики с гравитационно-флотационной схемой обогащения руды, различных категорий запасов и цен на золото (табл. 3, рис. 4).

При цене золота 2650 руб./г и отработке балансовых запасов руды только категории C₁ чистый дисконтированный доход (NPV) отрицателен, минимальные дисконтированные убытки за период эксплуатации карьера при мощности 280 тыс. т/год составляют –371.2 млн руб. При отработке балансовых запасов категорий C₁ и C₂, цене золота 2650 руб./г и оптимальной проектной мощности карьера 400 тыс. т/год максимум чистого дисконтированного дохода составляет 201 млн руб.

С увеличением цены золота до 4500 руб./г оптимальная проектная мощность карьера не изменяется и составляет 400 тыс. т/год, чистый дисконтированный доход увеличивается до 2970.8 млн руб. при отработке балансовых запасов категорий C₁ и C₂. При увеличении цены золота область безубыточности расширяется. При цене золота 2650 руб./г область безубыточности составляет 280–600 тыс. т/год, а при цене золота 4500 руб./г эта область расширяется до 100–1500 тыс. т/год (рис. 4).

ТАБЛИЦА 3. Результаты оптимизации проектной мощности карьера “Брекчия” по условию максимума чистого дисконтированного дохода, млн руб.

Проектная мощность карьера, тыс. т /год	Балансовые запасы руды по категориям, тыс. т	
	649.9 (C ₁)	1059.9 (C ₁ и C ₂)
Цена золота 2650 руб./г		
0	-700.0	-700.0
100	-1399.9	-1561.0
200	-534.2	-269.0
280	-371.2	79.0
400	-404.5	201.0
500	-546.0	133.0
600	-740.6	-15.0
700	-968.1	-213.0
800	-1218.1	-443.0
Цена золота 4500 руб./г		
0	-700.0	-700.0
100	-1561.3	550.9
200	-269.1	2293.1
280	78.7	2771.9
400	200.7	2970.8
500	132.8	2919.4
600	-15.2	2767.0
700	-212.5	2553.1
800	-443.2	2298.5

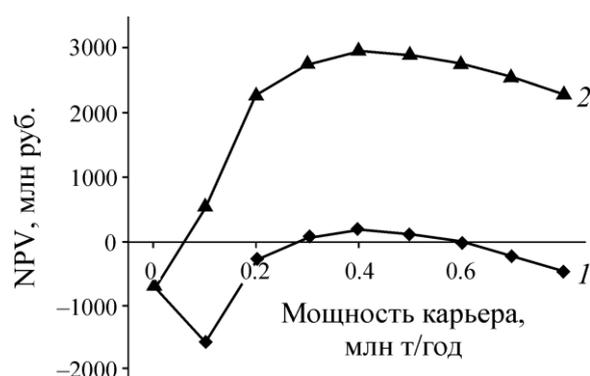


Рис. 4. Зависимость чистого дисконтированного дохода от мощности карьера “Брекчия” и цены золота 2650 (1) и 4500 руб. (2) при отработке балансовых запасов руды категорий C₁ и C₂

ВЫВОДЫ

В ИГД СО РАН разработана и апробирована методика оптимизации проектной мощности горнодобывающего предприятия на основе лагового моделирования по условию максимума интегральных экономических показателей — валовой дисконтированной выручки, валовой дисконтированной прибыли и чистого дисконтированного дохода. Использование данной ме-

тодики для оптимизации проектной мощности золоторудного карьера “Брекчия” при отработке балансовых запасов руды категорий C_1 и C_2 и цене золота 4500 руб./г приводит к следующим выводам и рекомендациям:

— по условию максимума интегральной дисконтированной выручки оптимальная проектная мощность карьера составляет 500–600 тыс. т/год;

— по условию максимума интегральной дисконтированной прибыли оптимальная проектная мощность карьера увеличивается до 800–900 тыс. т/год;

— по условию максимума наиболее общего критерия — чистого дисконтированного дохода, учитывающего рыночные цены на золото, эксплуатационные затраты и инвестиции на строительство карьера, оптимальная проектная мощность карьера составляет 400 тыс. т/год.

По результатам расчетов рекомендуется увеличить проектную мощность карьера “Брекчия” с 280 до 400 тыс. т/год, это позволит получить расчетный экономический эффект в виде разности значений чистого дисконтированного дохода: 198.9 млн руб. за срок службы карьера или 50 млн руб./год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lerchs H. and Grossman I.** Optimum design of open pit mines, Transactions CIM, Vol. 68, 1965. — P. 47–54.
2. **Johnson T.** Optimum open pit mine production scheduling. University of California Berkeley OSA, 1968. — 131 p.
3. **Gershon M.** Optimum mine production scheduling. Evaluation of large-scale mathematical programming approaches. Int. J. Mining engineering. Vol. 1, 1983.
4. **King II. B.** Optimal Mine Scheduling Policies, PhD Thesis, University of London, London, 2000.
5. **Cacceta L., Hill S.** An application of branch and cut to open pit mine scheduling. J. Global Optimization, Vol. 27, 2003. — P. 349–365.
6. **Dimitrakopoulos R.** Orebody modelling and strategic mine planning: old and new dimensions in a changing World., Proc. Int. Symp., Western Australia, 2009.
7. **Dimitrakopoulos R., Farrelly C., and Godoy M.** Moving forward from traditional optimization: Grade uncertainty and risk effects in open-pit design, Trans. Inst. Min. Metall., Min. Technology, Vol. 111, 2002. — P. 82–89.
8. **Whittle J. and Rozman L.** Open pit design in the 90's, in: Proceedings of Mining Industry Optimisation Conference, Australasian Ins. Min. Metall., 1991. — P. 13–19.
9. **Ramazan S. and Dimitrakopoulos R.** Stochastic optimization of long-term production scheduling for open pit mines with a new integer programming formulation, Orebody Modelling and Strategic Mine Planning, Australasian Inst. Min. Metall., Spectrum Series, Vol. 14, 2007. — P. 359–366.
10. **Stone P., Froyland G., Menabde M., Law B., Pasyar R., and Monkhouse P.** Blasor-blended iron ore mine planning optimisation at Yandi, orebody modelling and strategic mine planning, Spectrum Series, 2007. — P. 39–46.
11. **Ramazan S.** The new fundamental tree algorithm for production scheduling of open pit mines, Eur. J. Operational Research, Vol. 177, 2007. — P. 1153–1166.
12. **Lane K.** The economic definition of ore: Cut-off grades in theory and practice, Min. J. Books, London, 1988. — 168 p.

13. **Hoerger S., Bachmann J., Criss K., and Shortridge E.** Long term mine and process scheduling at Newmont's Nevada Operations, Twenty-eighth Int. Symposium Application Computers Operations Research Mineral Industry, 1999. — P. 739–747.
14. **Menabde M., Froyland G., Stone P., and Yeates G.** Mining schedule optimisation for conditionally simulated orebodies, Orebody Modelling and Strategic Mine Planning, Spectrum Series, 2007. — P. 91–100.
15. **Elkington T. and Durham R.** Open pit optimisation — Modelling time and opportunity costs, Transactions Inst. Min. and Metall., Section A: Mining Technology, Vol. 118, 2009. — P. 25–32.
16. **Элкингтон Т., Дурхэм Р.** Объединение задач определения размера приконтурных блоков и оптимизации производственной мощности карьера // ФТПРПИ. — 2011. — № 2. — С. 41–56
17. **Яковлев В. Л., Зырянов И. В., Акишев А. Н., Саканцев Г. Г.** Определение границ алмазородных карьеров с учетом разновременности затрат на вскрышные работы // ФТПРПИ. — 2016. — № 6. — С. 106–113.
18. **Акишев А. Н., Зырянов И. В., Корнилков С. В., Кантемиров В. Д.** Совершенствование методов обоснования производственной мощности и срока существования алмазоносных карьеров // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 77–83.
19. **Саканцев Г. Г., Ческидов В. И., Зырянов И. В., Акишев А. Н.** Обоснование параметров уклонов вскрывающих выработок при открытой разработке глубокозалегающих месторождений // ФТПРПИ. — 2018. — № 1. — С. 87–96.
20. **Цымбалюк Т. А., Ческидов В. И.** Методика выбора модели драглайна для отработки вскрышных пород на разрезах. // ФТПРПИ. — 2020. — № 4. — С. 59–69.
21. **Ордин А. А.** Динамические модели оптимизации проектной мощности шахты. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 1991. — 160 с.
22. **Опарин В. Н., Ордин А. А.** О теории Хабберта и предельных объемах добычи угля в Кузнецком угольном бассейне // ФТПРПИ. — 2011. — № 2. — С. 121–135.
23. **Ордин А. А., Клишин В. И.** Оптимизация технологических параметров горнодобывающих предприятий на основе лаговых моделей. — Новосибирск: Наука, 2009. — 165 с.
24. **Ордин А.А., Васильев И.В.** Выбор оптимальной глубины перехода от открытых работ к подземным при отработке угольного месторождения // ФТПРПИ. — 2014. — № 4. — С. 97–109.
25. **Капутин Ю. Е.** Информационные технологии планирования горных работ. — СПб.: Недра, 2004. — 420 с.
26. **Косов В. В., Лившиц В. Н., Шахназаров А. Г.** Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. — М.: Экономика, 2000. — 421 с.

Поступила в редакцию 03/II 2021

После доработки 14/III 2021

Принята к публикации 15/III 2021