

Обоснование сценарного подхода к определению границ карьеров с учетом стохастического характера исходных данных

Фомин С. И.¹, Говоров А. С.^{1*}

¹ Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: govorovalex5487@mail.ru

Реферат

Введение. В работе проведено обоснование сценарного подхода к определению границ карьеров, представлена система с набором определенных состояний и условиями перехода из одного состояния в другое.

Актуальность темы исследования обоснована необходимостью повышения надежности и устойчивости проектных решений относительно границ карьеров к изменению внешних факторов.

Цель работы – обоснование сценарного подхода к определению границ карьеров с учетом стохастического характера исходных геологических и экономических данных.

Методика проведения исследования. Основополагающий метод для обоснования границ карьеров – математическое моделирование и анализ данных о содержаниях полезных компонентов в руде и изменении цен на минеральное сырье во времени. В методику проведения исследования заложены принципы работы с исходными данными в условиях неопределенности.

Результаты. На примере золоторудного месторождения установлено, что распределение содержания полезного компонента подчинено логарифмически нормальному закону распределения. Выявлены наиболее вероятные значения содержаний, определена прогнозная цена на золото и сформулированы два сценария развития событий: пессимистичный и оптимистичный.

Выводы. Сценарный подход позволяет определить возможные проектные максимальные и минимальные границы карьеров при соответствующих значениях бортового содержания. Эти два варианта могут быть использованы для принятия проектных решений по изменению границ карьеров в пределах между максимальными и минимальными в условиях волатильности рынка минерального сырья при изменении экономических или геологических исходных данных.

Ключевые слова: полезные компоненты; бортовое содержание; карьер; границы карьеров; рудные месторождения; стохастический характер; исходные данные.

Введение. При разработке рудных сложноструктурных месторождений важной задачей проектирования является выбор стратегии определения границ карьеров [1].

Цель работы – разработка и обоснование сценарного подхода к определению границ карьеров. Обосновывается применение методов математической статистики с целью снизить негативные последствия влияния стохастического характера исходных геологических и экономических данных на результаты реализации проектных решений.

Методика проведения исследования. Для определения и обоснования границ карьеров предполагается рассмотрение двух сценариев развития событий:

- сценарий 1, $NPV = 0$, границы карьера максимальны (NPV – Net Present Value, чистая приведенная стоимость);
- сценарий 2, $NPV = \max$, границы карьера минимальны.

Метод представляется как система, характеризующаяся некоторыми состояниями и условиями перехода от одного состояния к другому.

На схеме (рис. 1) представлены 4 состояния системы.

S-1 – состояние, в котором происходит анализ геологических данных, а именно распределения содержания полезного компонента в руде для блочной модели. Переход к следующему состоянию происходит после получения данных о распределении и диапазоне наиболее вероятных значений содержаний полезного компонента в массиве месторождения.

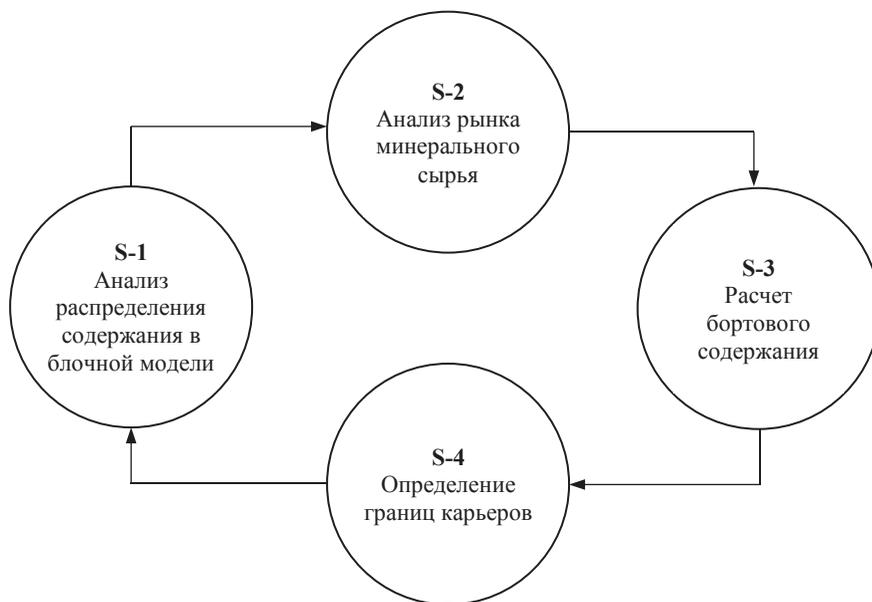


Рисунок 1. Схема реализации стратегии определения границ карьеров
Figure 1. Scheme of executing the strategy of open pit limits determination

S-2 – состояние, когда анализируется экономическая ситуация на рынке определенного вида минерального сырья. Переход к следующему состоянию происходит после получения информации о трендах развития цен на рынке и прогнозирования минимальных и максимальных цен.

S-3 – состояние определения бортового содержания (БС) полезного компонента. Переход к следующему состоянию осуществляется после определения максимальных и минимальных БС.

S-4 – состояние, когда производится оптимизация границ карьеров. Результатом оптимизации являются два вида возможных границ: максимальные и минимальные. Переход к первому состоянию осуществляется через 1 год или с учетом изменения геологических или экономических исходных данных.

Одним из факторов, в наибольшей степени влияющим на определение границ карьеров, является бортовое содержание полезного компонента. Бортовое содержание – это показатель, характеризующий разделение руды и вскрышной породы при проектировании границ карьера [2, 3].

При проектировании карьеров необходимо учитывать стохастический характер исходных геологических и экономических данных [4–6].

Неподтверждение данных геологической разведки приводит к снижению экономических показателей отработки, корректировке проектных решений или вообще

к консервации открытой разработки. Одним из вариантов снижения степени неопределенности геологических исходных данных является использование результатов эксплуатационной доразведки месторождений, проводимых параллельно с ведением эксплуатационных горных работ [7, 8].

При долгосрочном проектировании границ карьеров и стратегии их изменения целесообразно применять инструменты математической статистики. С помощью анализа распределения содержаний полезных компонентов в рудном массиве выявляются диапазоны наиболее вероятных значений содержаний и составляются обоснованные прогнозы по распределению содержаний по глубине месторождения [9–11].

Как правило, содержания полезных компонентов в руде распределяются в массиве согласно нормальному или логарифмически нормальному закону распределения (рис. 2).

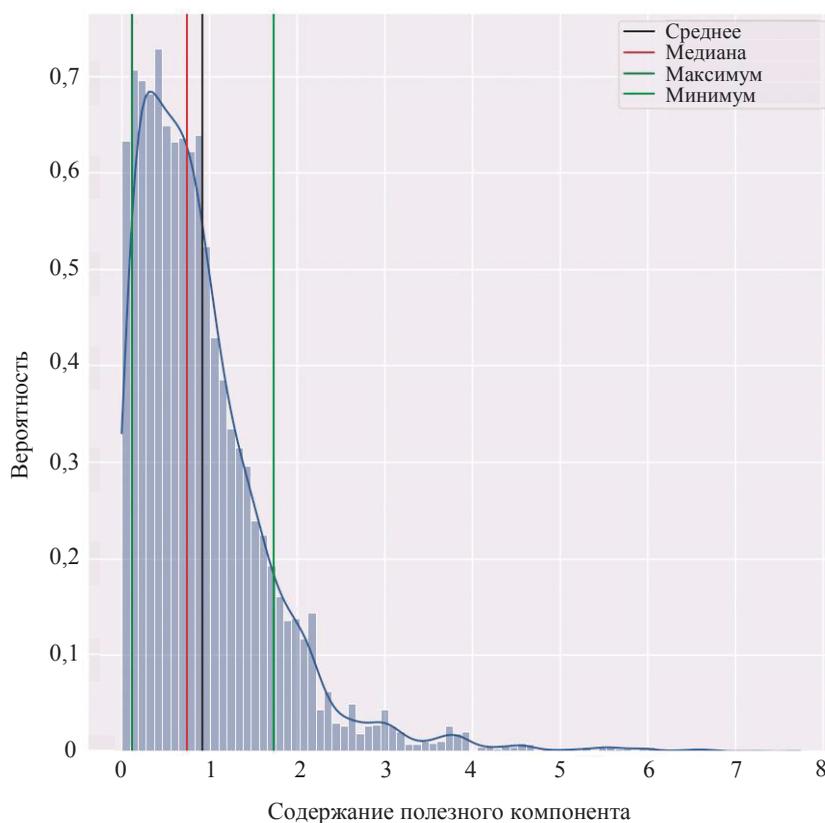


Рисунок 2. Гистограмма результатов анализа распределения полезного компонента на золоторудном месторождении

Figure 2. Histogram of commercial element distribution analysis in the gold ore field

Анализ данных, представленных на графике (рис. 2), позволяет сделать вывод, что содержания полезных компонентов на золоторудном месторождении распределены по логнормальному закону. Наиболее вероятными являются содержания, находящиеся в пределах от 0,11 до 1,73 г/т при математическом ожидании в 0,92 г/т.

Для определения бортового содержания полезных компонентов в руде следует учитывать стохастический характер исходных данных о ситуации на рынках мине-

рального сырья. Цены золота и других металлов на финансовом рынке подвержены высокой степени волатильности [12–14].

Прогнозирование цен на рынке минерального сырья является многофакторной системной задачей. Однако финансовые аналитики и эксперты за годы наблюдения за рынком установили некоторые закономерности изменения цен и предложили математические инструменты для их идентификации [15–18].

Одним из способов оценки ситуации на рынках минерального сырья является установление тренда в изменении цен. Такие тренды могут быть восходящими и нисходящими.

На ранних стадиях проектирования целесообразно проводить анализ рынка по взвешенному скользящему среднему. Взвешенное скользящее среднее – преобразование простого скользящего среднего во временном ряду, где наибольший вес имеют последние значения, а наименьший – предыдущие.

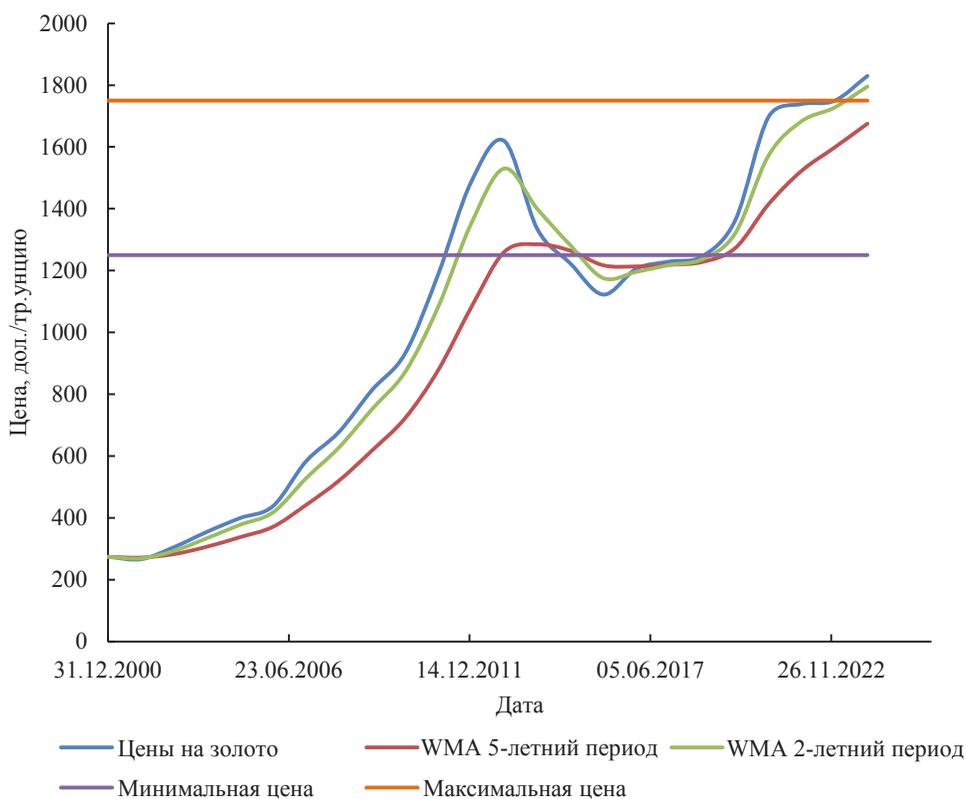


Рисунок 3. График изменения цен на золото (за период с 2000 до 2023 г.)

Figure 3. Gold price chart (from 2000 to 2023)

На рис. 3 представлены график изменения цен на золото и две линии взвешенного скользящего среднего за двухлетний и пятилетний периоды. Анализ данных, представленный на графике, показывает, что наблюдается возрастающий тренд, однако целесообразно учитывать вероятность снижения цен и проводить экспертную оценку.

Для обоснования границ карьеров предлагается рассмотреть два сценария: пессимистичный и оптимистичный.

Пессимистичный сценарий реализуется в случае, если цена на золото достигает уровня пятилетнего минимума. Оптимистичный сценарий характеризуется ростом цены, но в качестве возможного значения принимается прогнозная цена по взвешенному скользящему среднему. Текущие максимумы не рекомендуется принимать из-за высокой вероятности снижения цены от этой отметки.

В данном случае пессимистичный вариант достигается при цене на золото примерно 1250 дол. за тройскую унцию, оптимистичный вариант – 1750 дол. за тройскую унцию.

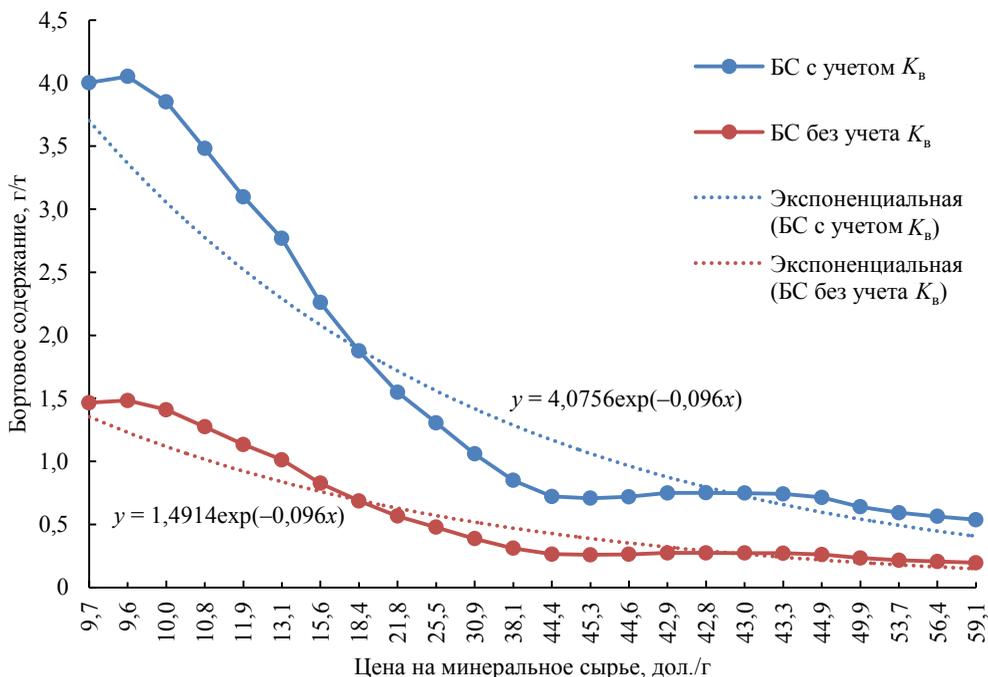


Рисунок 4. График зависимости бортового содержания от цены на золото с учетом и без учета коэффициента вскрыши

Figure 4. Graph of cutoff grade against gold price with and without the stripping ratio

При определении границ карьера важно учитывать наиболее вероятные значения содержаний полезных компонентов в массиве при определении бортового содержания полезных компонентов в добываемой руде. Это, как минимум, позволяет отслеживать, насколько принятое бортовое содержание соответствует наиболее вероятным значениям. В случае если рассчитанное БС попадает в зону менее вероятных значений и после будет использоваться в проектных решениях, то это может привести к корректировке проектных решений.

Предлагается определять бортовое содержание полезных компонентов в добываемой руде с учетом коэффициента вскрыши:

$$\alpha_p = \frac{\left[(Z_d + Z_{п.р} + Z_{кoc.р}) + K_v (Z_{вск} + Z_{п.п} + Z_{кoc.п}) \right]}{\left[\varepsilon (C - R) \right]}, \tag{1}$$

где Z_d , $Z_{п.р}$, $Z_{вск}$, $Z_{п.п}$ – текущие удельные эксплуатационные затраты на добычу, переработку руды, вскрышу и переработку породы, соответственно, р/т;

$Z_{\text{к.р.}}$, $Z_{\text{к.п}}$ – косвенные удельные затраты на добычу и переработку руды, на удаление и переработку породы, соответственно, р./т; $K_{\text{в}}$ – средний эксплуатационный коэффициент вскрыши, т/т; ε – извлечение полезного компонента из руды, %, C – цена конечного продукта на рынке минерального сырья, р./т; R – удельные затраты на маркетинг, р./т.

Расчет бортового содержания полезного компонента в руде с учетом средне-эксплуатационного коэффициента вскрыши позволяет на стадии определения оптимальных границ карьеров учесть разноску бортов в результате проектирования способа вскрытия, размещения системы съездов и других внутрикарьерных коммуникаций.

В случае если коэффициент вскрыши не учитывается в расчете на стадии оптимизации границ карьеров, то при проектировании системы съездов и других коммуникаций границы карьера расширятся за счет увеличения объемов удаляемой вскрышной породы до 1,5 раз [17].

На рис. 4 представлен график зависимости БС от цены на золото. На графике отображены БС с учетом коэффициента вскрыши и без него.

Для расчета используются максимальная и минимальная цены, определенные с помощью взвешенного скользящего среднего.

Выводы. Минимальное бортовое содержание, рассчитанное за период с 2018 до 2023 г. с учетом коэффициента вскрыши по формуле (1), составляет 0,53 г/т. Максимальное БС – 4,05 г/т. Без учета коэффициента вскрыши БС составило 0,19 и 1,48 г/т соответственно.

Зависимости, представленные на графике, показывают, что бортовые содержания, рассчитанные с учетом и без учета коэффициента вскрыши, существенно различаются. Также наблюдается увеличение разницы между двумя рассчитанными БС при ухудшении экономических условий.

При минимальном БС в ходе оптимизации максимальные границы будут достигаться при NPV проекта, равном нулю. При максимальном БС границы карьеров будут стремиться к минимуму, а NPV проекта будет достигать максимума.

Определение максимальных границ карьера на начальных стадиях проектирования позволяет не размещать на выделенной территории объекты и сооружения, которые могут препятствовать добыче запасов руды. Минимальные границы позволяют достигать максимума NPV при возможном ухудшении экономических условий.

Таким образом, использование инструментов математической статистики в анализе данных блочной модели месторождений, оценке и прогнозировании развития трендов изменения цен на рынке минерального сырья позволяет снижать негативное воздействие стохастического характера исходных геологических и экономических данных на принимаемые проектные решения по границам карьера.

Разработка сценариев при обосновании границ карьера позволяет оценить максимальные и минимальные границы, в пределах которых можно изменять промежуточные границы по этапам разработки месторождения в соответствии с внешними условиями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Litvinenko V. S., Tsvetkov P. S., Molodtsov K. V. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector // Eurasian mining. 2020. No. 1. P. 36–41.
2. Lerchs H., Grossmann I. F. Optimum design of open-pit mines // CIM. Bulletin 58. 1965. No. 633. P. 47–54.
3. Капутин Ю. Е. Обоснование бортового содержания и оптимизация стратегии развития открытых горных работ. СПб.: Недра, 2017. 280 с.

4. Брагин В. И., Харитоновна М. Ю., Мацко Н. А. Вероятностный подход к оценке динамического бортового содержания // Записки Горного института. 2021. № 251. С. 617–625. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.1
5. Lane K. F. The economic definition of ore: cut off grades in theory and practice. London: Mining Journal Books, 1991. 149 p.
6. Матрохина К. В., Трофимец В. Я., Мазаков Е. Б., Маховиков А. Б., Хайкин М. М. Развитие методологии сценарного анализа инвестиционных проектов предприятий минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. 2023. № 259. С. 112–124. DOI: 10.31897/PMI.2023.3
7. Gilani S.-O., Sattarvand J., Hajihassani M., Abdullah S. S. A stochastic particle swarm based model for long term production planning of open pit mines considering the geological uncertainty // Resources Policy. 2020. Vol. 68. P. 8–12. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101738
8. Dagdelen K., Kawahata K. Value creation through strategic mine planning and cutoff-grade optimization // Mining Engineering. 2008. No. 60. P. 39–45.
9. Шпанский О. В., Лигоцкий Д. Н., Борисов Д. В. Проектирование границ открытых горных работ. СПб.: СПГИ(ТУ), 2003. 90 с.
10. Фомин С. И., Пасынков Д. В., Семенов А. С. Оценка эффективности принятия проектных решений // Записки Горного института. 2009. Т. 180. С. 12–15.
11. Кантемиров В. Д., Яковлев А. М., Титов Р. С. Применение геоинформационных технологий блочного моделирования для совершенствования методов оценки качественных показателей полезных ископаемых // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 1. С. 63–73. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-63-73
12. Fomin S. I., Ivanov V. V., Semenov A. S., Ovsyannikov M. P. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. Vol. 15. P. 1306–1311.
13. Зайцев А. Ю. Методический подход к обоснованию капитальных вложений золоторудных месторождений на основе удельных затрат // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 459–464. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.459
14. Blischenko A. A. Modern mine survey techniques in the process of mining operations in open-pit mines (quarries) // Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues. 2019. P. 58–62. DOI: 10.1201/9781003017226-8
15. Kholmkiy A. V., Sidorov D. V. Arrangements for increase the efficiency of mining operations on the deep ore mines // Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues. 2019. P. 71–74. DOI: 10.1201/9781003017226-10
16. Armstrong M., Lagos T., Emery X., Homem-de-Mello T., Lagos G., Saure D. Adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty // Resources. 2021. Vol. 72. P. 515–529. DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102086
17. Пасынков Д. В., Семенов А. С. Определение эффективности инвестиций при реализации проектов рудных карьеров // Записки Горного Института. 2009. № 180. С. 12–15.
18. Стагурова О. В. Алгоритм Лерча-Гроссмана в задаче определения границ карьера в его предельном положении // Недропользование. XXI век. 2010. № 6. С. 38–42.

Поступила в редакцию 4 мая 2023 года

Сведения об авторах:

Фомин Сергей Игоревич – доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета. E-mail: fominsi@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0939-1189>

Говоров Алексей Сергеевич – аспирант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета. E-mail: govorovalex5487@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9071-862X>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-70-78

Justifying the scenario approach to pit limits determination taking into account the stochastic nature of the input data

Sergei I. Fomin¹, Aleksei S. Govorov¹

¹ Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia.

Abstract

Introduction. The research justifies the scenario approach to pit limits determination. The procedure is presented as a system with a set of certain states and conditions of transition from one state to another. The research relevance is explained by the importance of improving pit limit design solutions reliability and resistance to changing external factors, given the stochastic nature of the geological and economic input data.

Research objective is to justify the scenario approach to pit limits determination considering the stochastic nature of the geological and economic input data.

Methods of research. The fundamental method for pit limits justification is mathematical modeling and analysis of data on the content of useful components in ore and mineral prices change over time. The research methodology is based on the principles of working with initial data under uncertainty.

Results. By the example of a gold ore field, it has been found that the distribution of the useful components is subject to the log-normal law of distribution. The most likely values of the content have been found, the forecasted price of gold has been determined, and two scenarios of events have been formulated: pessimistic and optimistic.

Conclusions. The scenario approach allows to determine possible maximum and minimum pit design limits under corresponding values of cutoff grades. These two variants can be used for making design decisions on pit limits adjustment between the maximum and the minimum in conditions of mineral market volatility under changing economic or geological initial data.

Keywords: commercial elements; cutoff grade; open pit; pit boundaries; ore fields; stochastic nature; initial data.

REFERENCES

1. Litvinenko V. S., Tsvetkov P. S., Molodtsov K. V. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector. *Eurasian Mining*. 2020; 1: 36–41.
2. Lerchs H., Grossmann I. F. Optimum design of open-pit mines. *CIJ Bulletin*. 1965; 58(633): 47–54.
3. Kaputin Iu. E. *Rationale of cutoff grade and optimization of open-pit mining development strategy*. St. Petersburg: Nedra Publishing; 2017. (In Russ.)
4. Bragin V. I., Kharitonova M. Iu., Matsko N. A. A probabilistic approach to the dynamic cut-off grade assessment. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2012; 251: 617–625. (In Russ.) Available from: doi: 10.31897/PMI.2021.5.1
5. Lane K. F. *The economic definition of ore: cut off grades in theory and practice*. London: Mining Journal Books; 1991. 149 p.
6. Matrokhina K. V., Trofimets V. Ia., Mazakov E. B., Makhovikov A. B., Khaikin M. M. Developing the methodology of scenario analysis of investment projects of mineral resources sector enterprises. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2023; 259: 112–124. (In Russ.) Available from: doi: 10.31897/PMI.2023.3
7. Gilani S.-O., Sattarvand J., Hajihassani M., Abdullah S. S. A stochastic particle swarm based model for long term production planning of open pit mines considering the geological uncertainty. *Resources Policy*. 2020; 68: 8–12. Available from: doi: 10.1016/j.resourpol.2020.101738
8. Dagdelen K., Kawahata K. Value creation through strategic mine planning and cutoff-grade optimization. *Mining Engineering*. 2008; 60: 39–45.
9. Shpanskii O. V., Ligotskii D. N., Borisov D. V. *Designing the limits of open-pit mining*. St. Petersburg: SPGGI (TU) Publishing; 2003. (In Russ.)
10. Fomin S. I., Pasyukov D. V., Semenov A. S. Estimating the efficiency of making design solutions. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2009; 180: 12–15. (In Russ.)
11. Kantemirov V. D., Iakovlev A. M., Titov R. S. Applying geoinformation technologies of block modelling to improve the methods of assessing quality indicators of minerals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 1: 63–73 (In Russ.). Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2021-1-63-73
12. Fomin S. I., Ivanov V. V., Semenov A. S., Ovsiyannikov M. P. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020; 15: 1306–1311.
13. Zaitsev A. Iu. Methodological approach to substantiation of capital investments of gold ore fields based on unit costs. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2019; 238: 459–464. (In Russ.) Available from: doi: 10.31897/PMI.2019.4.459
14. Blischenko A. A. Modern mine survey techniques in the process of mining operations in open-pit mines (quarries). *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues*. 2019. P. 58–62. Available from: doi: 10.1201/9781003017226-8
15. Kholmskiy A. V., Sidorov D. V. Arrangements for increase the efficiency of mining operations on the deep ore mines. *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues*. 2019. P. 71–74. Available from: doi: 10.1201/9781003017226-10
16. Armstrong M., Lagos T., Emery X., Homem-de-Mello T., Lagos G., Saure D. Adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty. *Resources*. 2021; 72: 515–529. Available from: doi: 10.1016/j.resourpol.2021.102086

17. Pasyukov D. V., Semenov A. S. Determining the efficiency of investment when executing ore mine projects. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2009; 180: 12–15. (In Russ.)

18. Stagurova O. V. Lerch-Grossman algorithm in the problem of open coast mining delimitation in its limited position. *Nedropolzovanie. XXI vek = 21 Century Subsoil Use*. 2010; 6: 38–42. (In Russ.)

Received 4 May 2023

Information about the authors:

Sergei I. Fomin – DSc (Engineering), professor of the Department of Mineral Deposits Development, Saint Petersburg Mining University. E-mail: fominsi@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0939-1189>

Aleksei S. Govorov – PhD student, Department of Mineral Deposits Development, Saint Petersburg Mining University. E-mail: govorovalex5487@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9071-862X>

Для цитирования: Фомин С. И., Говоров А. С. Обоснование сценарного подхода к определению границ карьеров с учетом стохастического характера исходных данных // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 5. С. 70–78. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-70-78

For citation: Fomin S. I., Govorov A. S. Justifying the scenario approach to pit limits determination taking into account the stochastic nature of the input data. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 5: 70–78 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-70-78