

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

С. И. Фомин, А. Лелен, А. С. Говоров

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: При проектировании карьеров следует учитывать стохастический характер исходных данных, применять экспертный анализ и прогнозные оценки перспектив развития ситуации на рынке минерального сырья. Принимаемые проектные решения при определении параметров и показателей открытой разработки месторождений должны обеспечивать необходимую норму рентабельности горнодобывающего предприятия в течение всего времени эксплуатации месторождения и обладать определенной устойчивостью к изменениям горнотехнических, горно-геологических и экономических условий разработки. Надежность результатов анализа, оценок и прогнозов зависит от временного горизонта. При большом горизонте прогнозирования повышается вероятность выявления новых, непредвиденных обстоятельств, при которых может потребоваться существенная корректировка проектных решений. Увеличение периода прогнозирования приводит к расширению области возможных проектных решений, увеличению риска их неподтверждения. Прогнозирование спроса и волатильности цен на минеральное сырье, базирующиеся на обоснованных современных представлениях о ценности и уровне потребления различных видов полезных ископаемых в будущем, позволяет повысить надежность проектных решений.

Ключевые слова: сценарии реализации, проект, месторождение, открытая разработка, прогнозирование, надежность, стратегии

Благодарность: Благодарим коллектив кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за содействие в подготовке статьи к опубликованию.

Для цитирования: Фомин С. И., Лелен А., Говоров А. С. Оценка надежности проектных решений при определении параметров и показателей открытой разработки месторождений. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 60-66. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_60_66.

PROJECT DECISIONS RELIABILITY ASSESSMENT OF DEFINITION OPENCAST MINING PARAMETERS AND INDICATORS

S. I. Fomin, A. Lelen, A. S. Govorov

St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract: Introduction. When designing a opencast mine, it is necessary to establish the boundaries of the efficiency zone and develop scenarios for the implementation of the project, recommendations for the formation of the working zone of the opencast mine during the operation of the field, taking into account the stochastic nature of the initial geological data. The higher the recoverable value of minerals, the higher the costs of geological exploration are acceptable to reduce the risk of non-confirmation of the initial design information. The uncertainty of the implementation of design solutions for the development of deposits is explained by a number of factors.

Methodology. The reliability of the implementation of the adopted design decisions decreases sharply with the increase in the forecasting period. It is inexpedient to make realistic forecasts for more than 15 years due to the growth of project and financial risk over time, as well as the discounting factor. Errors in long-term forecasting are compensated by the fact that the economic value of indicators of the distant future is leveled by the procedure of discounting multi-time costs. Methods of quantitative analysis of

project risk are sensitivity analysis, scenario analysis and risk modeling by Monte Carlo. It is expedient to assess the sensitivity of a criterion economic indicator (for example, net present value) to various types of deviations in the initial data accepted at the initial stage of design by developing scenarios for the implementation of the project in various mining and mining and geological conditions, taking into account the volatility of prices and demand in the mineral market.

Conclusions. Systematic consideration of scenarios for the development of the working area of the open pit and the construction of its contours is achieved by taking into account the mutual influence of parameters and indicators, such as the angle of slope of the pit wall, the marginal stripping factor, the boundary cut-off content of useful components.

Summary. Establishment in the design documentation of the opencast mine productivity that is possible in terms of mining technical factors, close to the production capacity of mining equipment, leads to the absence of a reserve for increasing productivity at the mining

enterprise. To ensure the possibility of prompt response to changes in the external conditions of the project implementation, it is advisable to build a reserve of production capacity. On the one hand, the formation and maintenance of reserves reduces the risk of not achieving the design productivity of the opencast mine, and on the other hand, it is associated with additional costs. The creation of reserves provides an opportunity to stabilize the productivity of the open pit in a certain range of volatility of the external conditions of the project implementation.

Keywords: scripts of realization, project, deposit, opencast mining, prediction, reliability, strategies

Acknowledgment: We thank the staff of the Department of Mineral Deposits Development of St. Petersburg Mining University for their assistance in preparing the article for publication.

For citation: Fomin S. I., Lelen A., Govorov A. S. Project decisions reliability assessment of definition opencast mining parameters and indicators. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):60-66. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_60_66.

Введение

При проектировании карьера следует установить границы зоны эффективности и разработать сценарии реализации проекта и рекомендации по формированию рабочей зоны карьера в процессе эксплуатации месторождения, с учетом стохастического характера исходных геологических данных. Чем выше извлекаемая ценность полезных ископаемых, тем большие затраты на геологическую разведку допустимы для уменьшения риска неподтверждения исходной проектной информации.

Ряд фактор объясняют неопределенность реализации проектных решений при разработке месторождений:

1. Исходные горно-геологические данные обладают стохастическим характером. Снижение степени неопределенности геологических данных достигается проведением детальной доразведки, но это влечет за собой рост затрат на работы по геологической разведке месторождения. Суммарные затраты на первоначальную разведку месторождения и возможные ущербы от неподтверждения запасов впоследствии должны стремиться к минимуму.

2. Экспертиза проектной документации проведена на недостаточно квалифицированном уровне.

3. Прогнозирование рынков минерального сырья и политической ситуации в мире содержит в себе ошибочные предположения.

4. Система оценки устойчивости показателей реализации проекта при изменении внешних факторов отсутствует.

Наиболее предпочтительными являются только сценарии проектных решений, в которые заложена возможность адаптации при изменении внешних условий. Гибкость проектных решений и величины видов затрат могут различаться в зависимости от варианта реализации проектного решения. Предпочтение может быть отдано таким сценариям, в которых прямые издержки более высокие, а адаптационные затраты низкие, что дает больше возможностей для гибкого изменения в зависимости от внешних факторов.

Надежность реализации принимаемых проектных решений резко снижается с увеличением периода прогнозирования. Делать реалистичные прогнозы более чем на 15 лет нецелесообразно из-за роста во времени проектного и финансового риска, изменения дисконтирующего фактора.

Неблагоприятные последствия реализации проекта могут быть нивелированы путем разработки, анализа технических, экономических и организационных мероприятий, рекомендованных к внедрению в случае непредвиденных обстоятельств [1–3]:

- создания резервных мощностей и складов продукции, резерва запасов по степени готовности к выемке;
- страхования недвижимости и разработка мер по предотвращению, ликвидации последствий чрезвычайных обстоятельств на опасном производственном объекте.

Проведение мероприятий по созданию стабилизирующих механизмов требует привлечения дополнительных затрат, подлежащих обязательному учету при определении экономической эффективности реализации проекта [4–6].

Цель работы: оценка надежности проектных решений при определении параметров и показателей открытой разработки месторождений.

Методология исследований

Оценку чувствительности критериального экономического показателя (например, чистого дисконтированного дохода (ЧДД) к различного рода отклонениям исходных данных, принятых на начальной стадии проектирования, целесообразно осуществлять посредством разработки сценариев реализации проекта в различных горнотехнических и горно-геологических условиях с учетом волатильности цен и спроса на рынке минерального сырья.

Для того чтобы оценить степень влияния различных факторов на величину чистого дисконтированного дохода карьера в количественной форме, целесообразно применить коэффициент эластичности, характеризующий степень реагирования функции на степень изменения аргумента [7–9]:

$$\varepsilon = \frac{100}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta y_i x_i}{\Delta x_i y_i} \quad (1)$$

где n – количество точек на кривой;

y_i – значение функции в i -й точке;

Δy_i – приращение функции в i -й точке;

x_i – значение аргумента в i -й точке;

Δx_i – приращение аргумента в i -й точке.

На рисунке 1 представлен график зависимости относительного изменения ЧДД от относительного отклонения параметров карьера, отрабатывающего крутопадающее рудное месторождение этапами.

По результатам оценки прогнозируемости выделяются параметры и показатели, оказывающие существенное влияние на исследуемый критериальный показатель и подлежащие детальному обоснованию в проектной документации [10–12].

Способ отработки месторождения полезных ископаемых разбиением на этапы влечет за собой дополнительные затраты на формирование временно нерабочего борта (ВНБ) и последующую его расконсервацию.

Блок-схема реализации сценария формирования рабочей зоны карьера с учетом прогнозирования ситуации на рынке минерального сырья на примере падения цены на рынке минерального сырья представлена на рисунке 2.

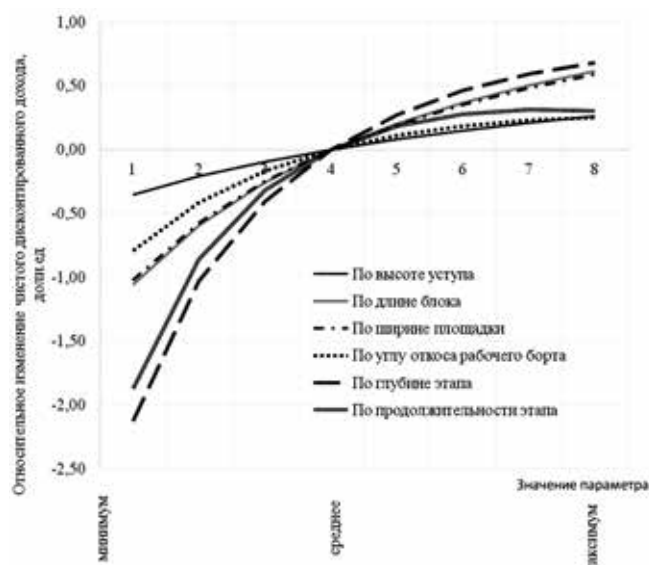


Рис. 1. График зависимости относительного изменения чистого дисконтированного дохода от относительного отклонения параметров карьера, отрабатывающего крутопадающее рудное месторождение этапами

Fig. 1. Graph of the dependence of the relative change in NPV on the relative deviation of the parameters of an open pit mine developing a steeply dipping ore deposit by stages

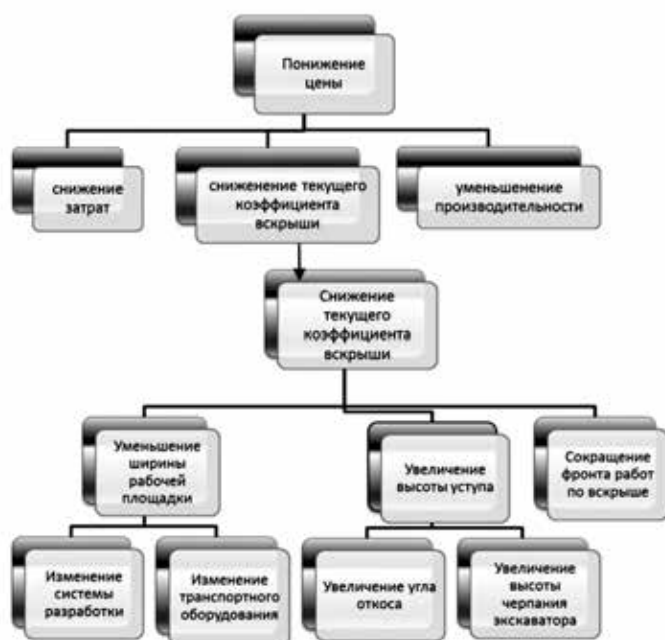


Рис. 2. Блок-схема реализации сценария формирования рабочей зоны карьера с учетом прогнозирования ситуации на рынке минерального сырья на примере падения цены на рынке минерального сырья

Fig. 2. Block diagram of the implementation of the scenario of formation of open pit's working zone, taking into account the forecasting the situation on the mineral market, on the example of the price drop on the mineral market

Результаты исследований

При проектировании карьеров следует разрабатывать возможные технические, экономические и финансовые решения для различных сценариев развития ситуации на рынке минерального сырья [13–15].

При понижении цен на рынке сырья для обеспечения необходимой нормы рентабельности и целесообразности отработки месторождения карьером необходимо снизить капитальные и эксплуатационные затраты, уменьшить произ-

водительность и текущий коэффициент вскрыши, изменить параметры системы разработки или временно законсервировать работу предприятия до более позитивных внешних условий реализации проекта [16–18].

1. Современная теория принятия проектных решений позволяет снизить уровень неопределенности исходных данных за счет разработанных способов, таких как:

- экспертные оценки, где мнения специалистов оцениваются с точки зрения субъективной вероятности;
- вероятностный подход;
- гарантированный подход;
- байесовский подход.

2. Упрощение алгоритмов решения задач достигается путем корректировки баз данных, что приведет к уменьшению суммарной ошибки в результатах.

3. Проектирование карьеров – это процесс, обладающий неопределенностью в конечном результате. В неопределенность входят исходные финансово-экономические, геологические и горнотехнические данные, носящие стохастический характер. Для достижения состоятельности и эффективности необходимо для оценки использовать достоверные исходные данные с целью минимизации проектного риска. Применение методов стохастического программирования и метода Монте-Карло позволяет при проектировании учесть неопределенность исходных данных. Такими исходными данными являются цены на минеральное сырье, эксплуатационные и капитальные затраты, инфляция и налоги [19–21].

4. Недостатком метода количественной оценки неопределенности в исходных данных является точечное рассмотрение параметров выбранной модели, следовательно, результат также будет соответствовать среднему значению. Представление переменных в виде распределения плотностей вероятностей соответствующей определенной целевой функции позволит повысить информативность результатов при технико-экономическом моделировании процессов [22–24].

5. Современная практика принятия проектных решений включает в себя системный анализ геологических, горнотехнических, экономических факторов, а также анализ рисков инвестирования реализации проектов [25–27].

6. Построение рабочей зоны карьеров с учетом сценариев ее развития может быть реализовано принимая во внимание взаимное влияние параметров и показателей работы системы карьер, таких как угол откоса борта карьера, граничный коэффициент вскрыши, граничное бортовое содержание [28–34].

Заключение

Для достижения и поддержания установленной проектной мощности карьеров по полезному ископаемому рационально проводить такие организационно-технические мероприятия, как:

1. Отработка карьерных полей значительной протяженности очередями. В этом случае разработку месторождения ведут последовательно на относительно технологически независимых участках. Параметры участков определяются с учетом возможности обеспечения нормативной скорости движения фронта горных работ на уступах. Скорость продвижения фронта работ и возможность создания подготовленных и готовых к выемке запасов, определяемых согласно требованиям по обеспечению рационального уровня надежности

работы системы — карьер, определяет продолжительность периода горных работ на каждом участке борта карьера.

2. Применение при проведении горно-строительных и горно-капитальных работ специализированных технологических комплексов горнотранспортного оборудования с меньшими параметрами и размерами позволяет увеличить скорость углубки карьера, уменьшить текущий коэффициент вскрыши и увеличить чистый дисконтированный доход от реализации проекта.

3. Уменьшение длины активного фронта горных работ при отработке месторождения этапами в случае оставления на остальных участках фронта минимальных рабочих площадок.

4. Формирование временно нерабочего борта, остановка выемочно-погрузочных работ на части фронта горных работ и чередование участков отработки позволяет сократить вовлеченный в разработку участок рабочей зоны карьера в плане и по высоте борта [31–33]. Такой способ отработки применяют в случае разработки мощных крутопадающих залежей, когда дно карьера достигает отметки от 100 м и более. В этом случае необходимо разместить на борту карьера полустационарные или буферно-усреднительные склады, если применяется комбинация автомобильного и ж/д транспорта.

5. Расположение на рабочих бортах нескольких перегрузочных пунктов для уменьшения дальности транспортирования горной массы автомобильным транспортом. При этом временно консервируется 30–50 % от общей длины добычного фронта и до 20–30 % общей длины вскрышного фронта. Продолжительность стационарного положения перегрузочного пункта на борту карьера в среднем составляет от 1 года до 3 лет, что позволяет формировать на рабочих бортах полустационарные съезды. Чередование участков ведения горных работ как в плане, так и по высоте рабочей зоны вызывает необходимость увеличения скорости углубки на отдельных участках карьера.

6. Сокращение вовлеченной в отработку рабочей зоны карьера может быть достигнуто за счет очередности ведения

горных работ на смежных рабочих уступах при сокращении ширины рабочей площадки. При уменьшении ширины рабочей площадки до бермы шириной 10–20 м и скорости продвижения фронта горных работ до 40–60 м/год период работ на смежных участках составит 0,5–1 года [34, 35]. Как правило, сокращение рабочей зоны карьера позволяет повысить эффективность использования горно-транспортного оборудования за счет концентрации горных работ.

7. Увеличение углов откосов рабочих бортов на различных этапах разработки месторождения достигается за счет корректировки параметров системы разработки или вида карьерного транспорта, например, переход с железнодорожного на автомобильный.

Выводы

1. В статье приведена оценка надежности проектных решений при определении параметров и показателей открытой разработки месторождений.

2. Установлено, что при проведении горно-строительных работ для увеличения скорости углубки, уменьшения капитальных вложений в разработку месторождения и увеличения ЧДД целесообразно сокращение высоты уступов, уменьшение ширины рабочих площадок и применение компактного строительного горнотранспортного комплекса. Формирование в этот период готовых к выемке и вскрытых запасов после завершения горно-строительных работ позволяет осуществлять стабилизацию коэффициента вскрыши и производительности карьера за счет формирования оптимальной формы борта карьера, корректировки способа вскрытия, изменения углов откосов рабочих бортов или формирования временно неработающих участков.

3. Прогнозирование спроса и волатильности цен на минеральное сырье, базирующиеся на обоснованных современных представлениях о ценности и уровне потребления различных видов полезных ископаемых в будущем позволяет повысить надежность проектных решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беляков НН. Моделирование открытых горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014;(12):45–51. [Belyakov NN. Modeling of open-pit mining. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2014;(12):45–51 (In Russ.)].
2. Бесимбаев НГ, Нагибин АА. Оптимизация этапов развития карьера. *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2013;(8):112–119. [Besimbaev NG, Nagibin AA. Optimization of quarry development stages. *Bulletin of PNIPU. Geology. Oil and Gas and Mining*. 2013;(8):112–9 (In Russ.)].
3. Бурмистров КВ, Овсянников МП. Обоснование параметров этапа открытых горных работ в переходные периоды разработки крутопадающих месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2018;(6):20–28. [Burmistrov KV, Ovsyannikov MP. Justification of the parameters of the open-pit mining stage during transition periods of development of steeply dipping deposits. *Mining information and analytical bulletin*. 2018;(6):20–8 (In Russ.)]. DOI: 10.25018 / 0236-1493-2018-6-0-20-28.
4. Галиев ЖК, Галиева НВ. Эффективность функционирования крупных угледобывающих предприятий. *Уголь*. 2019;6(1119):59–63. [Galiev ZhK, Galieva NV. Efficiency of large coal mining enterprises. 2019. *Coal*. 2019;6(1119):59–63 (In Russ.)]. DOI: 10.18796 / 0041-5790-2019-6-59-63.
5. Зайцев АЮ. Методический подход к обоснованию капитальных вложений золоторудных месторождений на основе удельных затрат. *Записки Горного института*. 2019;238:459–464. [Zaitsev AYU. Methodological approach to justifying capital investments in gold ore deposits based on specific costs. *Notes of the Mining Institute*. 2019;238:459–64 (In Russ.)]. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.459.

6. Земляной МА, Разоренов ЮИ, Денисов АВ. Экономико-математическая модель оценки технологической схемы добычи мергеля с учетом вовлечения в эксплуатацию запасов сдвоенных, строенных добычных уступов. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион*. 2013;3(172):103–106. [Zemlyanoy MA, Razorenov YuI, Denisov AV. Economic and mathematical model for assessing the technological scheme of marl mining taking into account the involvement of reserves of double and triple mining benches in the operation. *News of universities. North Caucasian region. Series: Technical sciences*. 2013;3(172):103–6 (In Russ.).]
7. Катышева ЕГ. Отраслевые особенности формирования собственных финансовых ресурсов на предприятиях горной промышленности. *Новый взгляд. Международный научный вестник*. 2014;(4):172–185. [Katysheva EG. Industry features of the formation of own financial resources at mining enterprises. *New look. International scientific bulletin*. 2014;(4):172–85 (In Russ.).]
8. Косолапов АИ, Пташник АИ, Пташник ЮП. Исследование возможности вариаций производственной мощностью рудных карьеров при разработке крутопадающих месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013;(9):55–61. [Kosolapov AI, Plashnik AI, Plashik YuP. Study of the possibility of varying the production capacity of ore quarries during the development of steeply dipping deposits. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2013;(9):55–61 (In Russ.).]
9. Косолапов АИ, Паршина ЕА. Исследование потенциальных возможностей интенсификации производственной мощности карьеров при этапной разработке крутопадающих месторождений в современных условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011;(6):50–66. [Kosolapov AI, Parshina EA. Study of potential possibilities of intensification of production capacity of quarries during staged development of steeply dipping deposits in modern conditions. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2011;(6):50–66 (In Russ.).]
10. Капутин ЮЕ. Горные компьютерные технологии и геостатистика. СПб.: Недра, 2002. 424 с. [Kaputin YuE. Mining computer technologies and geostatistics. St. Petersburg, 2002 (In Russ.).]
11. Капутин ЮЕ. Информационные технологии планирования горных работ. СПб.: Недра, 2008. 420 с. [Kaputin YuE. Information technologies for planning mining operations. St. Petersburg, 2008 (In Russ.).]
12. Немова НА, Бельш ТА. Оценка вариантов отработки прибортовых и подкарьерных запасов рудника «Олений ручей». *Известия ТПУ*. 2020;331(2):45–51. [Nemova NA, Belsh TA. Evaluation of development options for the near-pit and under-pit reserves of the Oleniy Ruchey mine. *Izvestiya TPU*. 2020;331(2):45–51 (In Russ.).]
13. Пешкова МХ, Шульгина ОВ. Современные методы оценки инвестиционной привлекательности компаний минерально-сырьевого комплекса. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015;(S1):193–208. [Peshkova MKh, Shulgina OV. Modern methods for assessing the investment attractiveness of companies in the mineral resources complex. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015;(S1):193–208 (In Russ.).]
14. Ракишев БР. Классификация технологических комплексов открытых горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014;(S1):297–306. [Rakishev BR. Classification of open-pit mining technological complexes. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014;(S1):297–306 (In Russ.).]
15. Логинов ЕВ, Тюленева ТА. Управление параметрами карьера в целях повышения эффективности использования гидравлических экскаваторов типа обратная лопата. *Уголь*. 2021;(12):6–10. [Loginov EV, Tyuleneva TA. Management of quarry parameters in order to increase the efficiency of using hydraulic backhoe excavators. *Coal*. 2021;(12):6–10 (In Russ.).] DOI 10.18796/0041-5790-2021-12-6-10.
16. Ракишев БР. Обоснование порядка формирования рабочих зон на глубоких карьерах при экскаваторно-автомобильных комплексах. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015;(1):27–34. [Rakishev BR, Moldabaev SK. Justification of the procedure for the formation of working zones in deep quarries with excavator-truck complexes. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015;(1):27–34 (In Russ.).]
17. Соколов ИВ, Смирнов АА, Никитин ИВ. Методика экономической оценки долгосрочных стратегических решений при комбинированной разработке рудных месторождений. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2021;(3):314–325. [Sokolov IV, Smirnov AA, Nikitin IV. Methodology for economic assessment of long-term strategic decisions in the combined development of ore deposits. *Bulletin of Tula State University. Earth Sciences*. 2021;(3):314–25 (In Russ.).] DOI: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-308-319.
18. Титова АВ, Голик ВИ. К диверсификации рудодобывающего комплекса как направления развития экономической системы депрессивного типа. *Горная промышленность*. 2020;(6):112–117. [Titova AV, Golik VI. Towards diversification of the ore mining complex as a direction for the development of a depressive-type economic system. *Mining Industry*. 2020;(6):112–7 (In Russ.).] DOI: 10.30686/1609-9192-2020-6-112-117.
19. Толобекова БТ. Особенности принципов управления современными горными проектами. *Проблемы науки*. 2018;5(29):117–119. [Tolobekova BT. Features of the principles of management of modern mining projects. *Problems of Science*. 2018;5(29):117–9 (In Russ.).]

20. Трубецкой КН, Краснянский ГЛ, Хронин ВВ. Проектирование карьеров: Учебник для вузов: В 2 т. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Академии горных наук, 2001. Т. I. 519 с. [Trubetskoy KN, Krasnyansky GL, Khronin VV. Design of quarries: Textbook. for universities: In 2 volumes. 2nd ed., revised. and enlarged. Moscow, 2001(In Russ.)].
21. Blischenko AA. Modern mine survey techniques in the process of mining operations in open-pit mines (quarries). *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues*. 2019;58-62. DOI: 10.1201/9781003017226-8.
22. Пасынков ДВ, Семенов АС. Определение эффективности инвестиций при реализации проектов рудных карьеров. *Записки горного института*. 2009;180:12–15. [Pasynkov DV, Semenov AS. Determination of investment efficiency in the implementation of ore quarry projects. *Notes of the Mining Institute*. 2009;180:12-5 (In Russ.)].
23. Фомин СИ, Пасынков ДВ, Семенов АС. Определение эффективности инвестиций при реализации проектов рудных карьеров. *Записки Горного института*. 2009;180:12–14. [Fomin SI, Pasynkov DV, Semenov AS. Determination of investment efficiency in the implementation of ore quarry projects. *Notes of the Mining Institute*. 2009;180:12-4 (In Russ.)].
24. ОВ. Шпанский, Лигоцкий ДН, Борисов ДВ. Проектирование границ открытых горных работ: учеб. Пособие. СПб.: Изд-во СПГИ(ТУ). 2003. 90 с. [Shpanskiy OV, Ligotsky DN, Borisov DV. Design of open-pit mining boundaries: a tutorial. Plekhanov State Mining Institute (Technical University). St. Petersburg, 2003 (In Russ.)].
25. Armstrong M, Lagos T, Emery X, et al. Adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty. *Resources Policy*. 2021;72:515-29. DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102086.
26. Фомин СИ, Пасынков ДВ, Семенов АС. Определение эффективности инвестиций при реализации проектов рудных карьеров. *Записки Горного института*. 2009;180:12-14. [Fomin SI, Pasynkov DV, Semenov AS. Determination of investment efficiency in the implementation of ore quarry projects. *Notes of the Mining Institute*. 2009;180:12-4 (In Russ.)].
27. Череповицын АЕ, Ларичкин ФД, Новосельцева ВД. [и др.] Методические подходы к сценарному планированию в минерально-сырьевом комплексе. *Проблемы развития территории*. 2017;6(92):53–67. [Cherepovitsyn AE, Larichkin FD, Novoseltseva VD, et al. Methodological approaches to scenario planning in the mineral resource complex. *Problems of development of the territory*. 2017;6(92):53-67 (In Russ.)].
28. Kholmiskiy AV, Sidorov DV. Arrangements for increase the efficiency of mining operations on the deep ore mines. *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues*. 2019;71-4. DOI: 10.1201/9781003017226-10 29.
29. Sidorenko AA, Sidorenko SA, Ivanov VV. Numerical modelling of multiple-seam coal mining at the taldinskaya-zapadnaya-2 mine. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2021;16(5):568-74.
30. Koteleva N, Valnev V. Automatic detection of maintenance scenarios for equipment and control systems in industry. *Applied Sciences*. 2023;13(24):12997. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132412997>.
31. Арсентьев АИ. Производительность карьеров. СПб., 2002. 85 с. [Arsentiev AI. Quarry productivity. Saint Petersburg, 2002 (In Russ.)].
32. Gilani S-O, Sattarvand J, Hajihassani M, Abdullah SS. A stochastic particle swarm based model for long term production planning of open pit mines considering the geological uncertainty. *Resources Policy*. 2020;68:12997. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101738.
33. Hustrulid W, Kuchta M. Open Pit Mine: Planning & Design. Rotterdam; Brookfield, VT: A.A. Balkema, 1998. 735 p.
34. Hall BE. «How mining companies improve share price by destroying shareholder value» Paper 1194 in Proceedings CIM Mining Conference and Exhibition. – Montreal: Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 2003.
35. Dimitrakopoulos R, Martinez L, Ramazan S. «Optimizing open pit design with simulated orebodies and Whittle Four-X: A maximum upside/minimum downside approach» In Proceedings of Orebody Modeling and Strategic Mine Planning Symposium, ed. R. Dimitrakopoulos and S. Ramazan. Perth. Australia: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2004.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS



Фомин Сергей Игоревич –
д-р техн. наук, профессор кафедры разработки
месторождений полезных ископаемых, Санкт-
Петербургский горный университет императрицы
Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия,
<https://orcid.org/0000-0002-0939-1189>, e-mail:
fominsi@mail.ru

Sergey I. Fomin –
Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of
Development of Mineral Deposits, St. Petersburg
Mining University of Empress Catherine II, St.
Petersburg, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0939-1189>, e-mail: fominsi@mail.ru



Лелен Алекса —
аспирант, Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II, г.
Санкт-Петербург, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-1358-1142>, e-mail: s215134@stud.spmi.ru

Aleksa Lelen —
postgraduate student of the department of construction
of Development of Mineral Deposits, St. Petersburg
Mining University of Empress Catherine II,
St. Petersburg, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1358-1142>,
e-mail: s215134@stud.spmi.ru



Говоров Алексей Сергеевич —
аспирант, Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II, г.
Санкт-Петербург, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-9071-862X>, e-mail: s215078@stud.spmi.ru

Alexey S. Govorov —
postgraduate student of the department of construction
of Development of Mineral Deposits, St. Petersburg
Mining University of Empress Catherine II,
St. Petersburg, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9071-862X>,
e-mail: s215078@stud.spmi.ru

Критерии авторства / Contribution:

С. И. Фомин — разработка концепции исследования, экспертное сопровождение проведения исследования, написание и корректировка текста статьи; А. Лелен — литературный обзор по теме исследования, проведение математического моделирования, написание текста статьи; А. С. Говоров — литературный обзор по теме исследования, разработка графических материалов, написание текста статьи / S. I. Fomin — development of the research concept, expert support for the research, writing and editing the text of the article; A. Lelen — literature review on the research topic, mathematical modeling, writing the text of the article; A. S. Govorov — literature review on the research topic, development of graphic materials, writing the text of the article.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.