

УДК 622.271.3
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4203
Шифр специальности ВАК: 2.8.7

Совершенствование методов определения потерь руды при проектировании разработки месторождения цементного сырья комбайнами послойного фрезерования

С.И. Фомин✉, А. Лелен

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

✉fominsi@mail.ru

Аннотация. Актуальность. При открытой разработке месторождений основными видами потерь и разубоживания руды, подлежащих нормированию, являются потери и разубоживание, образующиеся при отработке рудо-породных контактов. Карьерные комбайны Surface Miner позволяют осуществлять тонкослоевую разработку месторождения, которая способствует снижению влажности цементного сырья и уменьшению энергетических затрат на цементном заводе. На карьерах по добыче цементного сырья повышение экономической эффективности разработки месторождения карьерными комбайнами Surface Miner обеспечивается при рациональных значениях потерь и разубоживания руды. **Цель:** обоснование рационального уровня потерь цементного сырья при разработке месторождений карьерными комбайнами Surface Miner. **Объекты:** карьеры цементной промышленности, обрабатываемые с применением карьерных комбайнов Surface Miner. **Методы.** В качестве основных методов исследования был проведен технико-экономический анализ работы цементного завода Беочин (Сербия), синтез и обобщение материалов, источников и данных, находящихся в открытом доступе, а также были проведены расчеты по определению объемов потерь и разубоживания полезного ископаемого на контакте руда–порода для горнотехнических условий карьера по добыче цементного сырья. **Результаты.** Были обозначены основные проблемы, которые возникают при отработке карьеров по добыче цементного сырья, касающиеся определения объемов потерь минерального сырья при добыче на контакте руда–порода для горнотехнических условий карьеров предприятия по производству цемента Беочин. Авторами представляются и обосновываются выводы о дальнейшем эффективном применении оптимальной технологии отработки с применением карьерных комбайнов Surface Miner, которая позволяет снизить себестоимость добычи полезных ископаемых и удельные эксплуатационные затраты на транспортирование карбонатных горных пород по сравнению с традиционной технологией горных работ на 50–60 %.

Ключевые слова: разработка, месторождение минерального сырья, карьер, безвзрывная технология, фрезерный комбайн, параметры, потери, руда, разубоживание, экономический ущерб, коэффициент крепости

Для цитирования: Фомин С.И., Лелен А. Совершенствование методов определения потерь руды при проектировании разработки месторождения цементного сырья комбайнами послойного фрезерования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 202–208. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4203

UDC 622.271.3
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4203

Improvement of the methods for determining ore losses when designing cement raw material deposit mining by surface miner combines

S.I. Fomin✉, A. Ljeljen

Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

✉fominsi@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to optimize production of cement raw materials and reduce the cost of processing raw materials. A surface miner combine allow high selective mining of a deposit, which helps to reduce moisture content of cement raw materials and reduce energy costs in a cement plant. In open-cast mining of cement raw materials deposits with the use

of the surface miner combines, the increase in economic efficiency of mining operations can be achieved by determining the rational values of ore losses and dilution. **Aim.** To determine rational level of cement raw material losses during field development by surface miners. **Objects.** Cement industry quarries excavated with of the surface miner combines. **Methods.** Technical and economic analysis of the cement plant Beočin (Serbia), summation and synthesis of materials, sources and data available in the public domain, as well as calculations to determine the amount of loss and dilution of mineral resources at ore–rock contact for mining conditions of the quarry for extracting cement raw materials. **Results.** The main problems that arise during mining quarries for extracting cement raw materials have been identified. It concerns the determination of the volume of losses and dilution of mineral resources at the ore–rock contact for mining conditions of the quarry for extraction of cement raw materials. The authors present and substantiate conclusions about further effective application of optimal mining technology, with the use of the surface miner combines, which allows reducing the cost of production of minerals and specific operating costs of transporting carbonate rocks compared to the traditional technology of mining works at 50–60%.

Keywords: mining, mineral deposit, opencast mine, non-blast technology, surface miner, parameters, mineral loss, ore, mineral dilution, economic damage, strength coefficient

For citation: Fomin S.I., Ljeljen A. Improvement of the methods for determining ore losses when designing cement raw material deposit mining by surface miner combines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 202–208. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4203

Введение

Сырьевой базой предприятия по производству цемента Беочин с годовой производительностью 1,6 млн т цемента являются месторождения карбонатных пород, отрабатываемые двумя карьерами с годовой производственной мощностью соответственно 0,9 и 1,4 млн т [1, 2]. Полезная толща горизонтальная, мощностью более 40 м [3].

В табл. 1 представлены основные показатели разработки месторождения цементного сырья Беочин карьерными комбайнами Surface Miner.

Таблица 1. Показатели разработки месторождения цементного сырья Беочин комбайнами послойного фрезерования SM [составлено авторами]

Table 1. Indicators of Beočin cement deposit development by surface miner combines [compiled by the authors]

Показатели/Indicators	Цементный завод Беочин (Сербия) Cement plant Beočin (Serbia)
Разрабатываемые породы Rocks to be mined	Известняк, мергель Limestone, marl
Предел прочности на одноосное сжатие/среднее, МПа Uniaxial compressive strength/average, МПа	25–75/50
Коэффициент крепости по М.М. Протодяконову Strength coefficient by М.М. Protodyakonov	5–6
Типоразмер комбайна Combine type	2600 SM
Мощность фрезеруемого слоя, м Milling layer thickness, m	0,25
Скорость рабочего хода, м/мин Working speed, m/min	8
Производительность комбайна, т/ч Combine capacity, t/h	600
Расход резцов, шт./1000 т Cutter consumption, pcs./1000 tons	3
Расход дизельного топлива, л/ч Diesel fuel consumption, l/h	81

На предварительной стадии проектирования были рассмотрены следующие варианты технологий отработки:

1. Бульдозер-рыхлитель – пневмоколесный погрузчик – мобильный дробильный агрегат – забойный конвейер в контуре карьера, с дальнейшим перемещением минерального сырья конвейером по поверхности к месту переработки;
2. Буровзрывные работы – пневмоколесный погрузчик – транспортирование карьерными автосамосвалами – дробление на борту карьера, с дальнейшим перемещением минерального сырья конвейером по поверхности к месту переработки;
3. Комбайн послойного фрезерования 2600 SM (отделение горных пород от массива и дробление) – транспортирование карьерными автосамосвалами – перегрузка на борту карьера, с дальнейшим перемещением минерального сырья конвейером по поверхности к месту переработки.

Анализ технико-экономических показателей [4–7] для различных вариантов технологий отработки месторождения позволил установить, что при третьем варианте отработки месторождения карьером Беочин удельные затраты на добычу и переработку минерального сырья будут на 35–40 % ниже, чем при других вариантах.

По итогам анализа результатов работы карьерного комбайна Surface Miner для горнотехнических условий карьеров предприятия по производству цемента Беочин (Сербия) получены следующие выводы:

- Послойное фрезерование горных пород карьерным комбайном Surface Miner, по сравнению с подготовкой пород к выемке буровзрывным способом, обеспечивает уменьшение расхода горюче-смазочных материалов на предприятии более чем в 2 раза, уменьшение влажности до-

бываемого полезного ископаемого и повышение энергетической эффективности цементного производства.

- Применение карьерного комбайна Surface Miner позволило отказаться от стадии крупного дробления.
- При работе карьерного комбайна Surface Miner происходит выравнивание поверхности рабочих площадок, что с повышением использования грузоподъемности карьерных автосамосвалов способствует увеличению наработки на отказ, продолжительности эксплуатации горнотранспортного оборудования.
- Достижение рационального фракционного состава разрабатываемых горных пород, с размером куска меньше 80 мм, позволило обосновать целесообразность внедрения на предприятии поточной технологии.

Обоснование рационального уровня потерь руды при разработке месторождений карьерными комбайнами Surface Miner

При открытой разработке месторождений традиционно возникают потери минерального сырья в области контакта руды и вскрышных пород [8–11].

Увеличение потерь (η) приводит к уменьшению разубоживания (ρ) в области контакта руды и вскрышных пород [12–16]. Взаимозависимость этих величин можно оценить через коэффициент R , характеризующий отношение содержаний полезного компонента в руде и вмещающих породах [17]:

$$R = \frac{(\alpha_0 - b)\gamma_p}{(\alpha - \alpha_0)\gamma_v},$$

где α_0 – минимальное, экономически целесообразное содержание полезного компонента в руде, %; α – содержание полезного компонента в балансовых запасах руды, %; b – содержание полезного компонента во вмещающих породах, %; γ_p – плотность руды, т/м³; γ_v – плотность вмещающих пород, т/м³.

Технологические схемы отработки карьерными комбайнами Surface Miner применяются для горно-геологических условий месторождений, сложенных горизонтальными и наклонными рудными телами (пластами), без подготовки горных пород к выемке буровзрывным способом [18–20].

При реализации традиционной технологии ведения горных работ, после проведения буровзрывных работ, отработка запасов осуществляется с использованием гидравлических экскаваторов. Высота добычных уступов принимается равной 5 м, а на участках выклинивания с целью минимизации потерь возможна разбивка уступов на два подступа. При отработке запасов маломощных (до 2,0 м) участков выклинивания негативным аспектом при-

менения буровзрывной технологии является повышенное разубоживание, а также выход негабарита, требующего вторичного дробления.

При повышенных требованиях к качеству минерального сырья и необходимости снижения себестоимости, при ограниченности сырьевой базы, целесообразен переход на безвзрывную технологию фрезерования пластов полезного ископаемого.

Эффективное применение безвзрывной технологии послынного фрезерования для обеспечения минимизации потерь и разубоживания в условиях нечетких контактов руды и вмещающих пород невозможно без перманентно проводимой эксплуатационной разведки, геометрия сети которой сопоставима с технологическими параметрами работы горного комбайна: глубиной и шириной фрезерования [21]. Полученные расчетным путём оптимальные соотношения между потерями и разубоживанием, при горно-геологических условиях отсутствия четких визуальных границ рудных тел, возможны при обеспечении соответствия геометрии разведочных выработок частотной и амплитудной изменчивости отметок кровли и почвы рудных тел.

Частотная изменчивость требует дополнительного изучения по паспортам забоев горных выработок при последующих сопоставлениях материалов геологической разведки и эксплуатации. В противном случае полученные отношения потерь и разубоживания могут варьироваться, так же как и абсолютные значения этих показателей.

Анализ результатов исследований показывает, что полная зачистка запасов в углублениях почвы будет сопровождаться дополнительным разубоживанием – расчетная величина разубоживания повысится до 30 %.

При горно-геологических условиях отсутствия четких разделительных границ между кондиционными рудами и вмещающими породами практически невозможно обеспечить точную зачистку пласта руды при работе карьерного комбайна Surface Miner.

На рис. 1 представлены технологические схемы образования потерь и разубоживания руды при отработке слабонаклонных залежей цементного сырья карьерным комбайном Surface Miner.

Потери полезного ископаемого ΔP и засорение ΔV происходят в основном при отработке зон контакта руда–порода.

Величина потерь и разубоживания руды может быть значительно уменьшена при отработке залежей цементного сырья карьерным комбайном Surface Miner [22–24].

Объемы потерь и засорения руды, м³/м [25, 26]

$$\Delta P = \frac{(h - 2)^2}{2} (\cot \beta - \cot \alpha),$$

$$\Delta V = \frac{a^2}{2} (\cot \beta - \cot \alpha),$$

где h – высота добычного уступа, м; a – высота треугольника пород, примешиваемых к руде ($a=h/2$), м; α – угол откоса уступа, град.; β – угол падения пласта руды (рудного тела), град.

Исходные данные геологической разведки носят стохастический характер, и в случае неподтверждения данных разведочного бурения при вскрытии эксплуатационным забоем рудного пласта происходит снижение производительности горного комбайна, повышение расхода твёрдосплавных зубьев, снижение наработки на отказ и коэффициента технической готовности.

Потери и разубоживание на рудо-породных контактах представляют собой треугольники теряемой руды и примешиваемых вскрышных пород, образующиеся из-за несовпадения углов откосов уступов с углами падения залежи.

При работе карьерного комбайна Surface Miner, когда максимальная мощность отрабатываемого слоя составляет 0,6 м, величина потерь и разубоживания стремится к минимуму. Отрабатываемый контур близок по форме к гипсографии рельефа кровли и почвы рудных тел. Точность зачистки кровли пласта определяется объёмами и оперативностью данных, полученных при проведении эксплуатационной разведки.

От положения рабочего органа фрезерного комбайна относительно рудо-породного контакта (рис. 1), при несовпадении угла откоса уступа с углом падения контакта залежи, зависят объёмы потерь и разубоживания руды.

На рис. 1 представлены технологические схемы образования потерь и засорения полезного ископаемого при отработке наклонных залежей фрезерным комбайном для трех вариантов положения ра-

бочего органа фрезерного комбайна относительно рудо-породного контакта.

При определении объёмов потерь полезного ископаемого на контакте руда-порода высота уступа для экскаватора принята 12 м, а для карьерного комбайна Surface Miner – 0,4 м.

Для сравнительного анализа результатов применения при разработке месторождения экскаватора и карьерного комбайна Surface Miner принимается $\alpha=70^\circ$ и $\alpha=90^\circ$, соответственно.

График зависимости потерь руды на контакте руда-порода от угла падения пласта руды (рудного тела) для горнотехнических условий отработки месторождения с использованием экскаватора и фрезерного комбайна представлен на рис. 2.

Данные, представленные на рис. 2, позволяют сделать вывод, что потери руды при отработке месторождения с применением карьерного комбайна Surface Miner сокращаются на 10–15 % по сравнению потерями при использовании экскаватора.

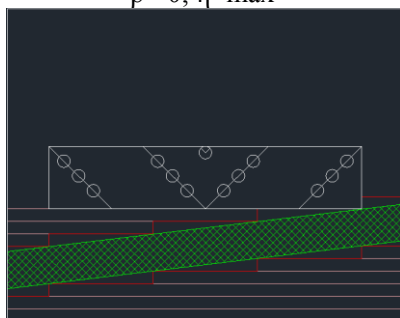
График зависимости объёмов разубоживания руды на контакте руда-порода от угла падения пласта руды (рудного тела) для горнотехнических условий отработки месторождения с использованием экскаватора и карьерного комбайна Surface Miner представлен на рис. 3.

Высота треугольника вскрышных пород, включаемых в добываемое полезное ископаемое ($a=h/2$) принимается 6 м, а для карьерного комбайна Surface Miner – 0,2 м.

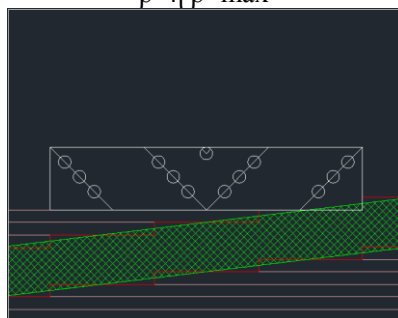
Данные, представленные на рис. 3, позволяют сделать вывод, что разубоживание руды при отработке месторождения с применением карьерного комбайна Surface Miner сокращается на 70–80 % по сравнению с разубоживанием с использованием на добыче экскаватора.

Варианты пересечения рабочего органа фрезерного комбайна с контактной зоной:

$\rho=0; \eta=\max$



$\rho=\eta \rho=\max$



$\eta=0$

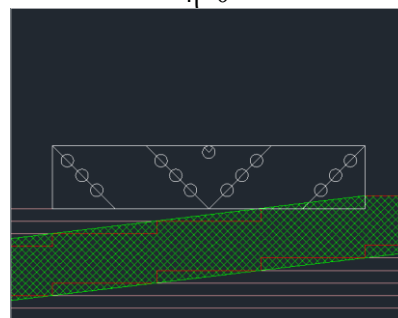


Рис. 1. Технологические схемы образования потерь и засорения полезного ископаемого при отработке слабонаклонных залежей фрезерным комбайном [27]

Fig. 1. Technological schemes of formation of losses and clogging of minerals during mining of slightly inclined deposits by surface miner combine [27]

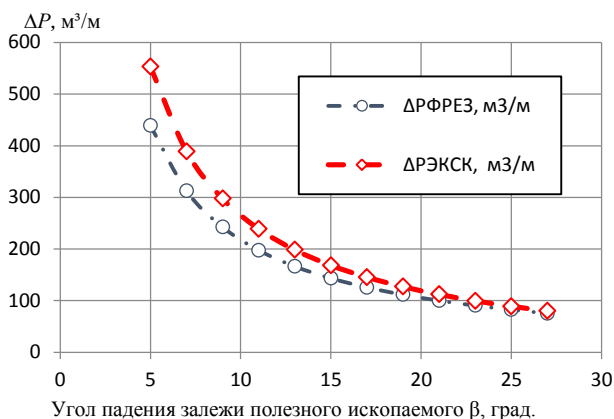


Рис. 2. График зависимости потерь руды на контакте руда–порода от угла падения пласта руды (рудного тела) для горнотехнических условий отработки месторождения с использованием экскаватора и карьерного комбайна Surface Miner [составлено авторами]

Fig. 2. Ore losses at the ore–rock contact as a function of the dip angle of the ore layer (ore body) for mining conditions of the deposit using excavator and surface miner combine [compiled by the authors]

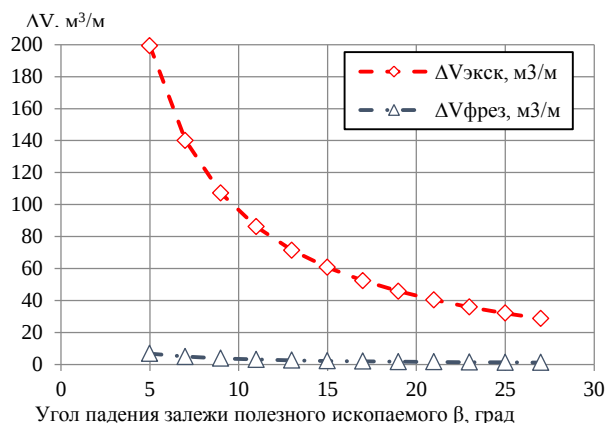


Рис. 3. График зависимости объемов разубоживания руды на контакте руда–порода от угла падения пласта руды (рудного тела) для горнотехнических условий отработки месторождения с использованием экскаватора и карьерного комбайна Surface Miner [составлено авторами]

Fig. 3. Ore dilution at the ore–rock contact as a function of the dip angle of the ore layer (ore body) for mining conditions of the deposit using excavator and surface miner combine [compiled by the authors]

Закключение

Невозможность обеспечить при буровзрывной подготовке горных пород к выемке тонкослоевую отработку приводит к тому, что значительные по мощности пропластки с низким содержанием полезных компонентов или вмещающие вскрышные породы включаются в рудную толщу. Одновременно при добыче руды выемка без потерь качества невозможна, в результате извлекаемые пласты горной массы относятся к некондиционным. Решение этой проблемы в значительной степени может обеспечить безвзрывная технология послойного фрезерования горных пород с использованием различных видов карьерного транспорта и селективной отработки руды.

Уровень потерь и разубоживания зависит от соответствия выбранных систем разработки особенностям геологического строения рудных тел.

Повышение экономической эффективности от применения рациональной технологии отработки месторождения достигается при применении карьерного комбайна Surface Miner за счёт уменьшения потерь руды, себестоимости добычи и удельных

эксплуатационных затрат на транспортирование горных пород, по сравнению с традиционной технологией горных работ, на 50–60 %.

Возможность получения оперативной геологической информации при отработке месторождения наряду с проектируемым изменением направления фронта горных работ карьерного комбайна Surface Miner по пласту руды, регулировка глубины заглубления барабана фрезерного комбайна обеспечивают снижение потерь и разубоживания руды, оптимальные условия для проведения селективной выемки и первичного усреднения руды.

Определение оптимальных потерь полезных ископаемых следует проводить с учётом горно-геологических и горнотехнических условий сложноструктурных месторождений, разработанных технологических схем отработки рудно-породных контактов, показателей извлечения полезных ископаемых из недр, обеспечивающих повышение экономической эффективности и достоверности проектных решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jovanović B. Technical project for limestone and overburden exploitation at the open pit Mutalj – I Stage // Mining Institute I.I.c. Belgrade. – 2014. – Vol. 1. – P. 112–119. (In Serbian).
2. Aničić S., Medak N. Study on lime stone reserves as cement ore in the Mutalj Basin near Bešenovo // Geostim I.I.c. Belgrade. – 2011. – Vol. 3. – P. 30–38. (In Serbian).
3. Management of the limestone mining and deposition process at the open pit Mutalj for the purpose of achieving the necessary quality / B. Jovanović, D. Milosevic, V. Čanović, K. Konc-Janković // Mining and Metallurgy Engineering Bor. – 2016. – № 1. – P. 51–54.
4. Чебан А.Ю. Совершенствование технологий открытой разработки месторождений с использованием карьерных комбайнов и отвалообразователей // Записки Горного института. – 2015. – Т. 214. – С. 23–29.
5. Чебан А.Ю. Применение фрезерных комбайнов в строительстве и на добыче строительных материалов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2012. – Т. 26. – № 3. – С. 105–108.

6. Зайцев Г.Д., Ческидов В.И. Оценка технологических и технических возможностей оборудования для безвзрывной добычи полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2006. – № 2. – С. 222–227.
7. Решетняк С.П., Мелихов М.В. Обоснование проектирования участков карьерных бортов без предохранительных берм // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование. – 2015. – Отдельный выпуск № 60-1. – С. 439–448.
8. Анистратов Ю.И., Анистратов К.Ю. и др. Открытые горные работы – XXI век. Справочник / под ред. К.Ю. Анистратова. – М.: ООО «Система максимум», 2019. – Т. 1. – 640 с.
9. Анистратов К.Ю., Анистратов Ю.И., Щадов М.И. Справочник по открытым горным работам. – М.: Горное дело, 2010. – 700 с.
10. Трубецкой К.Н., Краснянский Г.Л., Хронин В.В. Проектирование карьеров. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. – Т. I. – 519 с.
11. Арсентьев А.И. Производительность карьеров. – СПб: Санкт-Петербургский горный институт им. Г.В. Плеханова (техн. ун-т), 2002. – 85 с.
12. Characterization and quality evaluation of cement raw materials and their possible substitutes in Yemen / A.M. Al-Anweh, M.M. Abu-Zeid, M.I. El-Anbaawy, I.A. Al-Akhaly // Arabian Journal of Geosciences. – 2022. – Vol. 15. – № 14. URL: <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10527-2> (дата обращения: 15.04.2023).
13. Afeni T.B., Akeju V.O., Aladejare A.E. A comparative study of geometric and geostatistical methods for qualitative reserve estimation of limestone deposit // Geoscience Frontiers. – 2021. – Vol. 12. – № 1. – P. 243–253.
14. Bralić N., Malvić T. Cement raw material reserve calculation – geological sections vs. structural maps approaches, case study from Southern Croatia // Minerals. – 2022. – Vol. 12. – № 8. – 1056.
15. Фомин С.И., Кава П.Б. Нормирование и планирование полноты и качества добычи руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). – 2011. – № 4 – С. 371–373.
16. Зубов В.П., Анисимов К.А. Ресурсосберегающая технология подземной отработки запасов алмазосодержащих кимберлитовых рудных тел ниже дна карьера под защитной подушкой // Горный журнал. – 2023. – № 4. – С. 23–38. DOI: 10.17580/gzh.2023.04.05.
17. Фомин С.И., Чан Динь Бао Оптимизация потерь и разубоживания руды при открытой разработке сложноструктурных карбонатных месторождений // Маркшейдерия и Недропользование. – 2016. – Т. 82. – № 2. – С. 58–60.
18. Пихлер М., Панкевич Ю.Б. Технология и схемы ведения горных работ при использовании комбайнов 2100 и 2200 SM фирмы Wirtgen gmbh // Горная промышленность. – 2001. – № 4. – С. 51–53.
19. Zajączkowski M. Technological and economic analysis of the application of surface miner on the example of a limestone deposit in Poland // Inżynieria Mineralna. – 2021. – Vol. 48. – № 2. URL: <https://doi.org/10.29227/IM-2021-02-21> (дата обращения: 15.04.2023).
20. Авраамова Н.С. Технологические схемы разработки наклонных залежей с использованием фрезерного комбайна // Проблемы машиноведения и машиностроения. – СПб: Северо-Западный открытый технический университет, 2006. – № 35. – С. 149–152.
21. Виноградов И.П., Смелянский И.В. Определение потерь руды при проектировании технологии послойного фрезерования наклонных залежей сложного строения // Новая наука: проблемы и перспективы. – Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2015. – С. 184–188.
22. Фомин С.И., Виноградов И.П. Анализ безвзрывной технологии тонкослойной выемки с применением фрезерных комбайнов при открытой разработке месторождений цементного сырья // Цемент и его применение. – 2017. – № 4. – С. 42–44.
23. Volk H-J. Wirtgen drivers the development of surface mining // Procedia Engineering. – 2016. – № 138. – P. 30–39.
24. Dey K., Ghose A.K. Predicting “cuttability” with surface miners – a rockmass classification approach // Journal of Mines, Metals and Fuels. – 2008. – Vol. 56. – № 5–6. – P. 85–91.
25. Dagdelen K., Asad M.W.A. Optimum cement quarry scheduling algorithm // Proceedings of the 30th symposium on application of computers and operations research in the mineral industry. – Phoenix, USA: Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2002. – P. 697–709.
26. Optimisation of long-term quarry production scheduling under geological uncertainty to supply raw materials to a cement plant / T. Vu, T. Bao, C. Drebenstedt, H. Pham, H. Nguyen, D. Nguyen // Mining Technology. – 2021. – Vol. 130. – № 3. – P. 146–158.
27. Шевченко А.Г., Пихлер М., Панкевич Ю.Б. Безвзрывная разработка бокситовых руд комбайнами Wirtgen Surface Miner расширяет сырьевую базу рудника Дебеле (Гвинея) // Горная промышленность. – 2003. – № 2. – С. 44–45.

Информация об авторах

Сергей Игоревич Фомин, доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. fominsi@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0939-1189>

Алекса Лелен, аспирант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. s215134@stud.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1358-1142>

Поступила в редакцию: 22.04.2023

Поступила после рецензирования: 19.06.2023

Принята к публикации: 25.01.2024

REFERENCES

- Jovanović B. Technical project for limestone and overburden exploitation at the open pit Mutalj – I Stage. *Mining Institute l.l.c. Belgrade*, 2014, vol. 1, pp. 112–119. (In Serbian).
- Aničić S., Medak N. Study on lime stone reserves as cement ore in the Mutalj Basin near Bešenovo. *Geostim l.l.c. Belgrade*, 2011, vol. 3, pp. 30–38. (In Serbian).
- Jovanović B., Milosevic D., Čanović V., Konc-Janković K. Management of the limestone mining and deposition process at the open pit Mutalj for the purpose of achieving the necessary quality. *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, 2016, no. 1, pp. 51–54.
- Cheban A.Y. Improving the technology of open-cast mining using surface miners and spreaders. *Journal of Mining Institute*, 2015, vol. 214, pp. 23–29. (In Russ.)
- Cheban A.Y. Application of milling combines in construction and mining of construction materials. *Bulletin of Pacific National University*, 2012, vol. 26, no. 3, pp. 105–108. (In Russ.)
- Zajcev G.D., Cheskidov V.I. Assessment of technological and technical capabilities of equipment for blast-free mining. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)*, 2006, no. 2, pp. 222–227. (In Russ.)
- Reshetnyak S.P., Melihov M.V. Substantiation of pit walls without safety berms design. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2015, vol. 60-1, pp. 439–448. (In Russ.)
- Anistratov Yu.I., Anistratov K.Yu. *Opencast mining – XXI century*. Handbook. Ed. by K.Y. Anistratov. Moscow, OOO «Sistema maksimum» Publ., 2019. Vol. 1. 640 p. (In Russ.)
- Anistratov K.Yu., Anistratov Yu.I., Shchadov M.I. *Open-pit mining technology*. Moscow, Gornoe delo Publ., 2010. 700 p. (In Russ.)
- Trubetskoy K.N., Krasnyanskiy G.L., Khronin V.V. *Quarry design*. Moscow, Mining Academy Publ., 2001. Vol. I, 519 p. (In Russ.)
- Arsentev A.I. *Quarry productivity*. St Petersburg, G.V. Plekhanov St Petersburg Mining Institute Publ., 2002. 85 p. (In Russ.)
- Al-Anweh A.M., Abu-Zeid M.M., El-Anbaawy M.I., Al-Akhaly I.A. Characterization and quality evaluation of cement raw materials and their possible substitutes in Yemen. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, vol. 15, no. 14, 1291.
- Afeni T.B., Akeju V.O., Aladejare A.E. A comparative study of geometric and geostatistical methods for qualitative reserve estimation of limestone deposit. *Geoscience Frontiers*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 243–253.
- Bralić N., Malvić, T. Cement raw material reserve calculation – geological sections vs. structural maps approaches, case study from Southern Croatia. *Minerals*, 2022, vol. 12, no. 8, 1056.
- Fomin S.I., Kava P.B. Rationing and planning of completeness and quality of ore mining. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (Nauchno-tehnicheskiy zhurnal)*, 2011, no. 4, pp. 371–373. (In Russ.)
- Zubov V.P., Anisimov K.A. Resource-saving underground mining technology for diamond-bearing kimberlite ore under protective cushion below open pit mine bottom. *Gorny Zhurnal*, 2023, no. 4, pp. 23–38. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2023.04.05
- Fomin S., Chan Din Bao. Ore dilution and loss optimization for open-pit mining of carbonate rock deposits with complex structure. *Marksheyderiya i Nedropolzovanie*, 2016, vol. 82, no. 2, pp. 58–60. (In Russ.)
- Pihler M., Pankevich Yu.B. Mining technology and schemes for using the 2100 and 2200 SM shearers from Wirtgen gmbh. *Gornaya promyshlennost*, 2001, no. 4, pp. 51–53. (In Russ.)
- Zajączkowski M. Technological and economic analysis of the application of surface miner on the example of a limestone deposit in Poland. *Inżynieria Mineralna*, 2021, vol. 48, no. 2, pp. 237–242.
- Avraamova N.S. Technological schemes for the development of sloping deposits with the use of a Surface miner. *Problems of Mechanical Science and Engineering*. St Petersburg, North-West Open Technical University, 2006, vol. 35, pp. 149–152. (In Russ.)
- Vinogradov I.P., Smelyanskiy I.V. Determination of ore losses when designing the technology of layer-by-layer milling of inclined deposits of complex structure. *The New Science: Problems and Prospects*. RIC. Sterlicamat, AMI Publ., 2015. pp. 184–188. (In Russ.)
- Fomin S.I., Vinogradov I.P. Analysis of blast-free high selective mining excavation technology using milling machines in open-cast mining of cement raw material deposits. *Tsement i ego primenenie*, 2017, no. 4, pp. 42–44. (In Russ.)
- Volk H-J. Wirtgen drivers the development of surface mining. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 138, pp. 30–39.
- Dey K., Ghose A.K. Predicting “cuttability” with surface miners – a rockmass classification approach. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 2008, vol. 56, no. 5–6, pp. 85–91.
- Dagdelen K., Asad M.W.A. Optimum cement quarry scheduling algorithm. *Proceedings of the 30th symposium on application of computers and operations research in the mineral industry*. Phoenix, USA: Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2002. pp. 697–709.
- Vu T., Bao T., Drebenstedt C., Pham H., Nguyen H., Nguyen D. Optimisation of long-term quarry production scheduling under geological uncertainty to supply raw materials to a cement plant. *Mining Technology*, 2021, vol. 130, no. 3, pp. 146–158.
- Shevchenko A.G., Pihler M., Pankevich Yu.B. Blast-free mining of bauxite ores with Wirtgen Surface Miners expands the raw material base of the Debele mine in Guinea. *Gornaya promyshlennost*, 2003, no. 2, pp. 44–45.

Information about the authors

Sergey I. Fomin, Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg, 199106, Russian Federation. fominsi@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0939-1189>

Aleksa Ljeljen, Postgraduate Student, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg, 199106, Russian Federation. s215134@stud.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1358-1142>

Received: 22.04.2023

Revised: 19.06.2023

Accepted: 25.01.2024