

УДК 622.271:622.23

Кантемиров Валерий Данилович

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией управления
качеством минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: ukrkant@mail.ru

Титов Роман Сергеевич

старший научный сотрудник,
лаборатория управления качеством
минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: ukrigd15@mail.ru

Яковлев Андрей Михайлович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория управления качеством
минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: kriissy-puh@yandex.ru

**О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ
СТЕПЕНИ ВЗРЫВНОГО РЫХЛЕНИЯ
В КАРЬЕРЕ***Аннотация:*

В статье изложены представления о целесообразности повышения степени взрывного рыхления горных пород для горнотехнических условий открытой разработки отдельных групп рудных и нерудных полезных ископаемых (ПИ). Одной из предпосылок внедрения в практику горнорудного производства усиленного взрывного рыхления горных пород является вовлечение в эксплуатацию сравнительно небольших рудных и нерудных месторождений, что отчасти связано с расширением минерально-сырьевой базы редких полезных ископаемых и прогрессирующим сокращением балансовых запасов рудных месторождений, сопровождающихся существенным падением производственной мощности действующих карьеров. Поддержание объемов добычи на прежнем уровне по отдельным видам полезных ископаемых возможно при разработке небольших месторождений карьерами малой и средней мощности. Рудные месторождения, разрабатываемые карьерами данного типа, как правило, расположены в регионах, удаленных от металлургических центров и не имеющих развитой инфраструктуры. В этих условиях повышение степени взрывного рыхления рудной массы в карьере с целью исключения дорогостоящих трудоемких стадий крупного дробления в технологических процессах рудоподготовки сырья может стать одним из направлений повышения эффективности горнорудного производства.

Ключевые слова: карьеры, буровзрывные работы, дробление горных пород, экскавация горной массы, эффективность технологических процессов.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.04.036

Kantemirov Valery D.

Candidate of Technical Sciences,
Head of the Laboratory of quality management
of mineral raw materials,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: ukrkant@mail.ru

Titov Roman S.

Senior Researcher,
Laboratory of quality management
of mineral raw materials,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: ukrigd15@mail.ru

Yakovlev Andrey M.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of quality management
of mineral raw materials,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: kriissy-puh@yandex.ru

**ON THE EXPEDIENCY
OF INCREASING THE DEGREE
OF DRILLING AND EXPLOSIVE
LOOSENING IN THE QUARRY***Abstract:*

The article presents ideas about the expediency of increasing the degree of drilling and explosive loosening of rocks for mining conditions of open-pit mining of certain groups of ore and non-metallic minerals (PI). One of the prerequisites for the introduction of enhanced drilling and explosive loosening of rocks into the practice of mining is the involvement in the exploitation of relatively small ore and non-metallic deposits, which is partly due to the expansion of the mineral resource base of rare minerals and the progressive reduction in the balance reserves of ore deposits accompanied by a significant drop in the production capacity of existing quarries. It is possible to maintain production volumes at the same level for certain types of minerals when developing small deposits with small and medium-capacity quarries. Ore deposits developed by quarries of this type are usually located in regions remote from metallurgical centers and without developed infrastructure. Under these conditions, increasing the degree of drilling and blasting of ore mass in a quarry in order to eliminate expensive, time-consuming stages of large-scale crushing in the technological processes of ore preparation of raw materials may become one of the ways to increase the efficiency of mining production.

Key words: quarries, drilling and blasting, crushing of rocks, excavation of rock mass, efficiency of technological processes.

Введение

Усиленное взрывное рыхление (УВР) в карьере – это метод подготовки горной массы к выемке с использованием специальных параметров взрывных работ для повышения степени дробления и снижения крупности взорванной породы.

В связи с истощением запасов ряда крупных рудных месторождений в отработку все больше вовлекаются небольшие месторождения, которые разрабатываются карьерами малой и средней мощности. К малым относят карьеры с производительностью по полезному ископаемому до 1 млн т в год, а также с производительностью по горной массе до 2–4 млн м³ в год. К средним относят карьеры с производительностью по горной массе в диапазоне 4 – 6 млн т.

Сокращение дорогостоящих трудоемких стадий крупного дробления при рудо-подготовке добываемого минерального сырья в карьерах данной категории за счет повышения степени взрывного рыхления пород может стать одним из направлений повышения эффективности горнорудного производства.

Описание

Качество взрывной подготовки минерального сырья в карьере оказывает существенное влияние на эффективность смежных технологических процессов, особенно экскавации горной массы в забоях и первых стадий обогащения.

Дробление руды является первым этапом в процессе обогащения ПИ и производится, как правило, в 3 стадии:

- крупное – исходный кусок до 1000÷1300 мм, кусок на выходе 100 ÷350 мм;
- среднее – исходный кусок 100÷350 мм, кусок на выходе 30 ÷100 мм;
- мелкое – исходный кусок 30÷100 мм, кусок на выходе 5 ÷30 мм.

При этом наиболее энергоемкой и затратной является стадия крупного дробления. Капитальные затраты на крупное дробление составляют 30 – 50 % от общих затрат на дробление. В структуре обогатительных фабрик капитальные затраты на дробильный передел в составе 3-стадийного дробления могут достигать до 30 % от общих затрат (~ 20 млрд руб.) на строительство обогатительной фабрики (ОФ) производительностью 4 – 5 млн т обогащенной руды в год. Эксплуатационные затраты на крупное дробление могут превышать 85 % затрат на передел дробления ОФ [1, 2], в т. ч. благодаря большому расходу электроэнергии, связанному с техническими особенностями массивных дробилок крупного дробления (масса дробилки ККД-1500/180-2ГРЦ составляет 455 т, масса подвижного конуса – 85 т).

На практике средний кусок $d_{ср}$ на крупных рудных карьерах колеблется в пределах 300 – 450 мм при наличии крупных (800 – 1000 мм) и негабаритных (> 1000 мм) кусков в пределах 1,5–2,5 % (рис. 1).

Повышение степени дробления горных пород от буровзрывных работ (БВР) будет способствовать увеличению производительности дробильных установок и карьерных экскаваторов. Крупность кусков питания, как показывает практика эксплуатации дробилок и лабораторные исследования, в значительной степени влияет на их производительность. Кусковатость взорванной горной массы учитывается в производительности дробилок (Q_d) процентным содержанием кусков размером более половины ширины загрузочного отверстия ($\varnothing > 0,5B_d$), и чем меньше это соотношение, тем выше производительность дробильных установок (рис. 2).

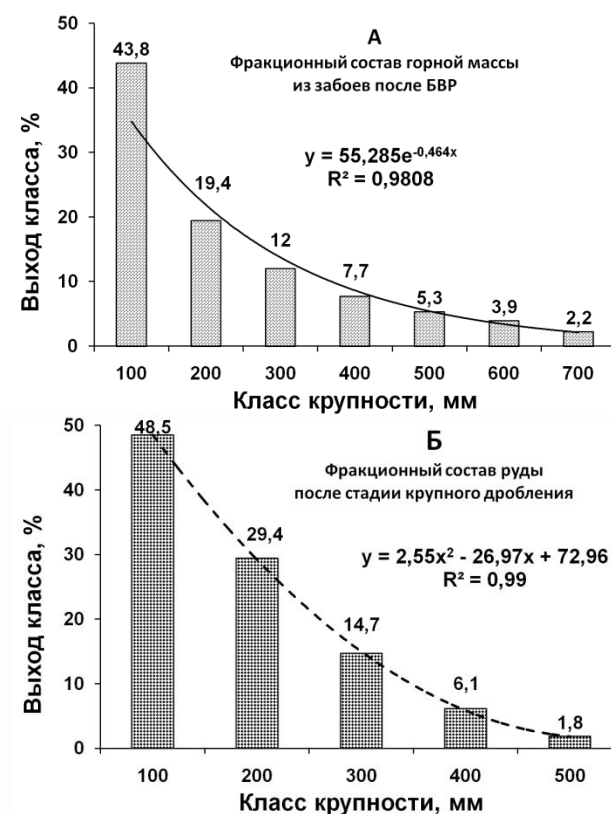


Рис. 1. Гистограмма распределения крупности горной массы при отгрузке после БВР и стадии крупного дробления:

А – крупность горной массы, поступающей из забоев;

Б – фракционный состав руды после стадии крупного дробления

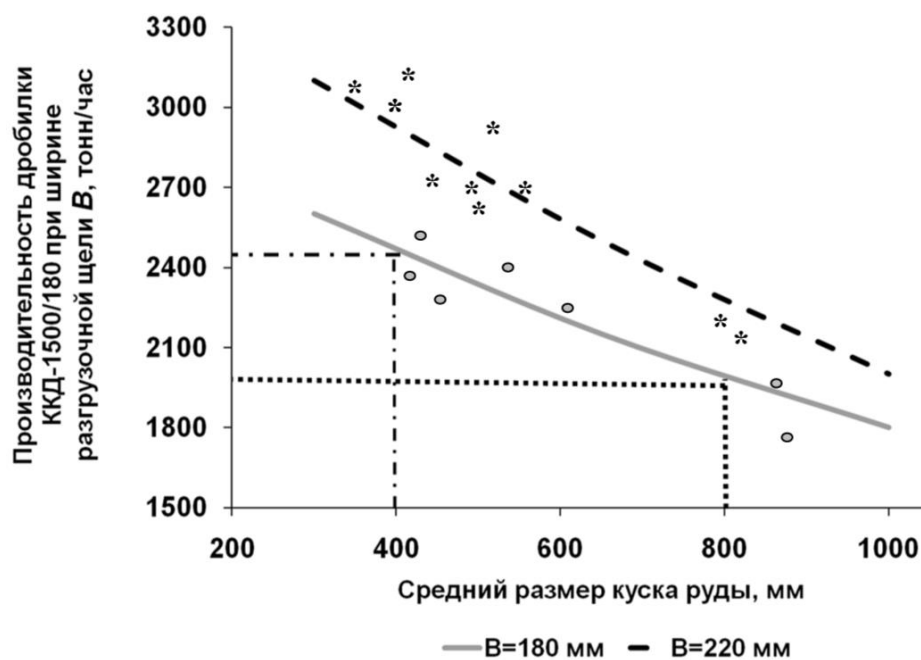


Рис. 2. Влияние среднего размера куска исходной руды на производительность конусной дробилки крупного дробления

Производительность экскаваторов также напрямую зависит от качества буровзрывной подготовки массива. С увеличением степени дробления породы в забое сокращается удельное сопротивление породы копанию и возрастает эффективность работы экскаваторов. Коэффициент разрыхления пород после БВР влияет на производительность экскаватора. Чем выше коэффициент разрыхления, тем сложнее для экскаватора разрабатывать забой, перемещать и добывать горный материал. Разрыхленный материал содержит больше пустот и воздуха, что увеличивает сопротивление копанию, снижает степень наполнения ковша и производительность экскаватора (рис. 3) [3 – 5].

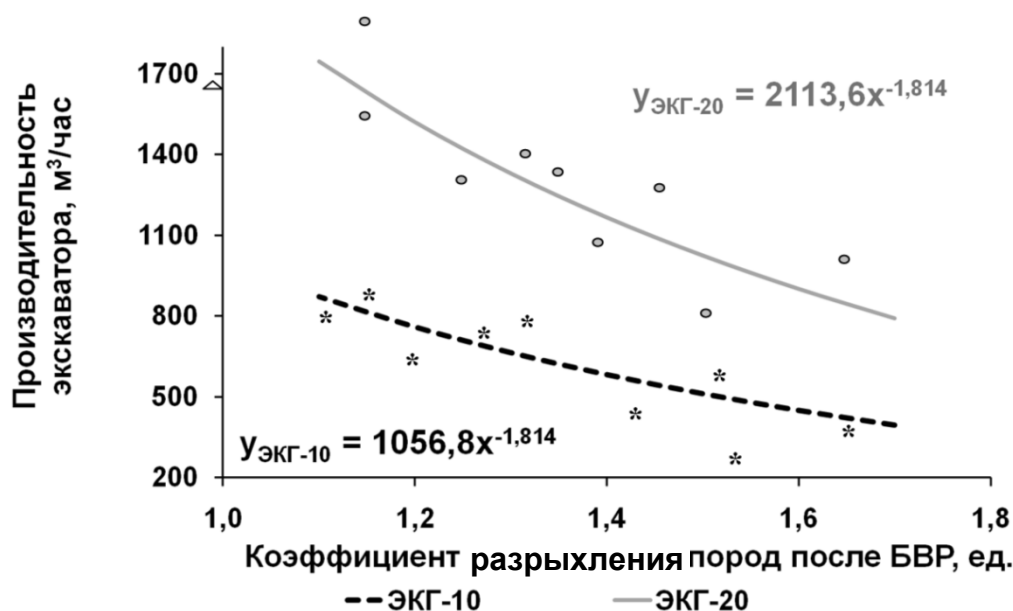


Рис. 3. Влияние коэффициента разрыхления пород после БВР на производительность экскаваторов типа ЭКГ

Существует оптимальный коэффициент разрыхления грунтов каждой категории, который соответствует минимальным затратам на буровзрывные работы при достижении величины сопротивления грунтов копанию (K_f), соответствующей номинальному режиму работы экскаваторов.

Известно [3], что степень разрыхления пород (k_p) связана с размером среднего куска (d_{cp}) следующей зависимостью:

$$k_p \approx 1 + d_{cp} . \quad (1)$$

Снизить категорию трудности экскавации породы в массиве ($N_{ц}$) возможно путем обеспечения заданной степени ее разрыхления (k_p) и кусковатости (d_{cp}).

Категория породы (N_B) после ее взрывной подготовки определяется из выражения:

$$N_B = N_{ц} - n_B , \quad (2)$$

где n_B – коэффициент (в единицах), учитывающий изменение категории породы при ее разрыхлении.

В свою очередь категория породы после взрыва (N_B) определяется по формуле:

$$N_B = N_{ц} \times k_p . \quad (3)$$

Расчеты показывают, что для рудных карьеров, разрабатывающих породы V - VI категорий по трудности экскавации ($K_f = 500 \div 800$ кН/м²), сокращение размера среднего куска (d_{cp}) взорванной горной массы до $0,175 b_k$ (где b_k – ширина ковша экскаватора) позволяет снизить категорию грунта на единицу и повысить производительность экскаваторов в забое на 20 – 25 %.

Из практики и на основании выполненных расчетов установлено, что при разработке прочных пород (песчаники, сланцы, граниты, кварциты, габбро, руды черных и цветных металлов) для обеспечения в карьере усиленного рыхления массива необходимо изменить параметры буровзрывных работ [6 – 10] с соблюдением следующих требований:

- 1) диаметр скважин (D) не должен превышать 160 мм;
- 2) расчетная линия сопротивления по подошве (W) относительно диаметра скважин не должна превышать значений: $W_0 \approx 24 \div 27 D$;
- 3) расстояние между скважинами (a): $a \approx 27 \div 31 D$;
- 4) коэффициент сближения скважин (m_0): $m_0 = a / W_0 = 1,15$;
- 5) перебур скважины (L_{Π}) не должен превышать значений: $L_{\Pi} \approx 8 \div 10 D$;
- 6) форма сетки расположения скважин – шахматная равносторонняя;
- 7) взрывание многорядное (свыше 3-х рядов);
- 8) размещение заряда по высоте – равномерное (за счет создания по длине заряда воздушных промежутков).

Для конкретного предприятия эти параметры уточняются в проектах БВР с учетом повышения опасности для производственных объектов увеличением диаметра разлета кусков и увеличением радиуса опасных зон.

Большое влияние на качество взрыва оказывает четкое соблюдение сетки расположения скважин. Отклонения от среднего размера сетки (Δa), достигающей $\pm 5D$, увеличивают выход негабарита в $\sim (1 + \Delta a/a)$ раз [7]. В крепких породах рекомендуется использование более мощных ВВ, улучшающих качество дробления.

Реализация мероприятий по усилению взрывного рыхления пород сопровождается увеличением затрат на дополнительные работы по бурению, заряданию и взрыванию скважин. Для оценки влияния параметров БВР (удельного расхода ВВ, расстояния между скважинами и др.) на экономические показатели выполнены расчеты с использованием специально разработанных компьютерных программ и данных предприятий, некоторые результаты которых представлены на рис. 4, 5.

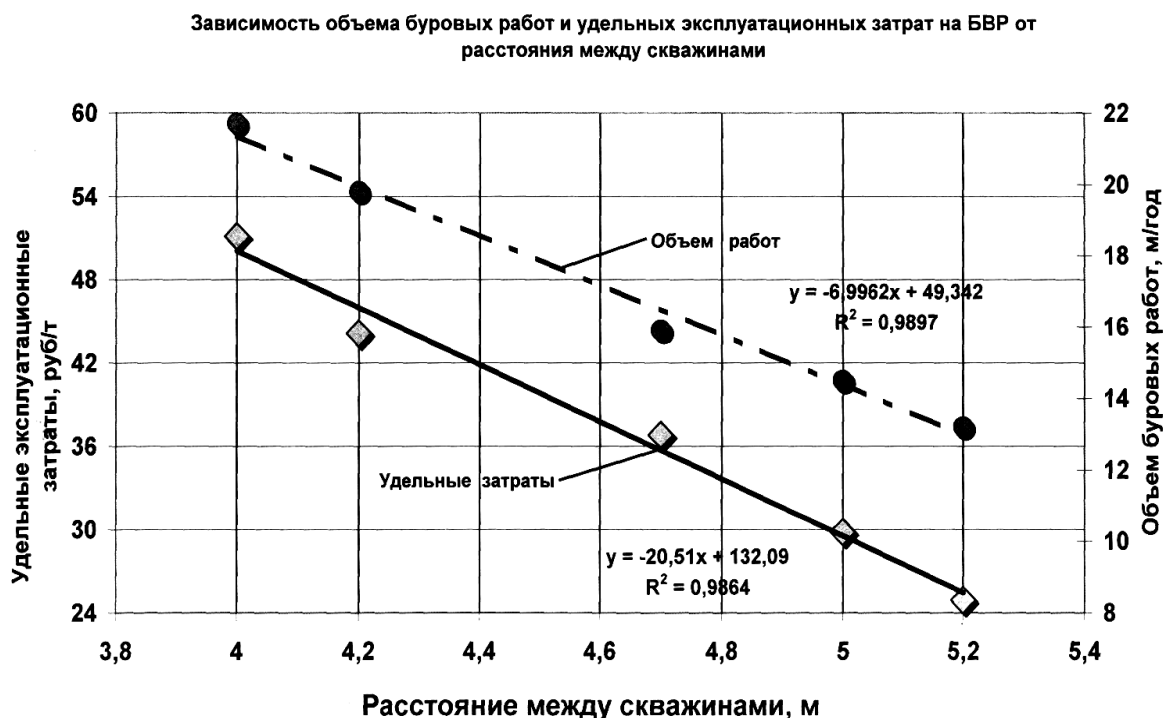


Рис. 4. Влияние расстояния между буровыми скважинами на объем буровых работ и удельные эксплуатационные затраты на БВР

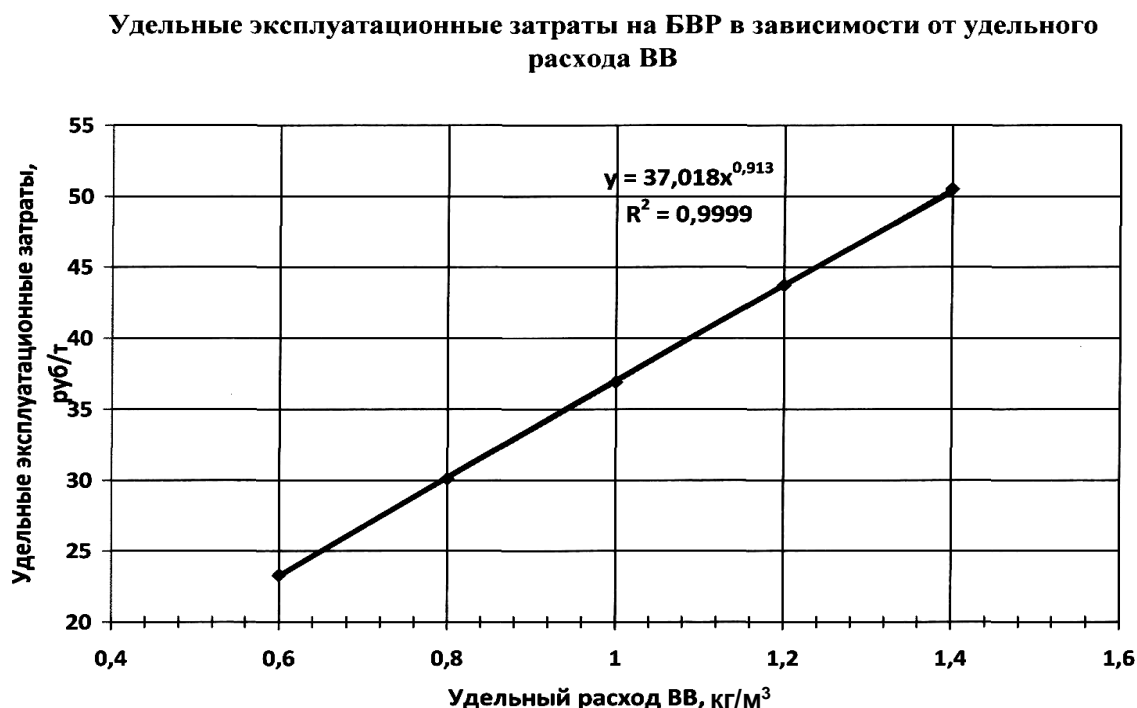


Рис. 5. Зависимость удельных эксплуатационных затрат на БВР от удельного расхода ВВ на отбойку 1 м³ горной массы

Результаты расчетов свидетельствуют о росте себестоимости БВР при переходе на усиление взрывного рыхления пород, что может оказаться неприемлемым для ряда карьеров с большим объемом бурения и взрывания скважин за счет увеличения затрат и усложнения организации работ.

Однако для небольших предприятий с объемами переработки горной массы в 1-3 млн м³/год экономия от сокращения затрат на экскавацию и крупное дробление позволит получать стабильный общий экономический эффект.

Выводы

Исключение стадии крупного дробления из технологических процессов обогащения руды за счет усиленного взрывного рыхления пород в карьере может стать одним из направлений сокращения затрат при изготовлении рудных концентратов и повышении их потребительских свойств.

Сокращение стадии крупного дробления при производстве щебня из горных пород, в т. ч. из пород вскрыши, позволяет повысить прочность и качество фракций щебня, т.к. ударные воздействия на горные породы в дробилках крупного дробления приводят к существенному ослаблению структуры исходного материала и способствуют его ускоренному разрушению и измельчению.

С увеличением степени дробления полезного ископаемого в забое сокращается удельное сопротивление породы копанию и растет производительность экскаваторов на 20 – 30 %. Напрямую линейно зависит от среднего размера куса питания и производительность дробильных установок, а исключение стадии крупного дробления из технологических процессов рудоподготовки минерального сырья для небольших предприятий, с объемами добычи до 2 млн м³/год, позволяет значительно сократить эксплуатационные расходы.

Таким образом, повышение степени взрывного рыхления рудной массы в карьере с целью исключения дорогостоящих трудоемких стадий крупного дробления в техноло-

гических процессах рудоподготовки сырья может стать одним из направлений повышения эффективности горнорудного производства при неустойчивом спросе на продукцию в условиях рынка.

Список литературы

1. Козин В.З., 2009. *Исследование руд на обогатимость*. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 380 с.
2. Булгаков А.Г., Дыба В.П., Скибин Г.М., 2011. *Механика грунтов в решении геотехнических задач*. Новочеркасск: Наука. Образование. Культура, 326 с.
3. Беляков Ю.И., 1983. *Проектирование экскаваторных работ*. Москва: Недра, 349 с.
4. Друкованный М.Ф., Тартаковский Б.Н., Вишняков В.С., Ефремов Э.И., 1974. *Влияние дробления пород на эффективность технологических процессов открытой разработки*. Киев: Наукова думка, 268 с.
5. Кантемиров В.Д., 2011. Перспективы использования мощных экскаваторно-автомобильных комплексов при освоении новых сырьевых баз. *Горный информационно-аналитический бюллетень, Отд. вып. № 11. Проблемы недропользования*, С. 383 - 387.
6. Михайлов А.Г., 2002. *Проектирование параметров взрывных работ на карьерах*. Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 268 с.
7. Комащенко В.И., Носков В.Ф., Лебедев Ю.А., 1995. *Буровзрывные работы: Учебник для вузов*. Москва: Недра, 413 с.
8. Кантемиров В.Д., 2014. Технологические особенности освоения новых сырьевых баз. *Горный информационно-аналитический бюллетень, № 6*, С. 369 – 373.
9. Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Яковлев А.М., 2019. Анализ эксплуатационных показателей горнодобывающего оборудования ведущих железорудных карьеров России. *Известия вузов. Горный журнал, № 2*, С. 40-50, DOI: 10.21440/0536-1028-2019-2-40-50.
10. Кутузов Б.Н., Белин В.А., 2012. *Проектирование и организация взрывных работ*. Москва: Издательство «Горная книга», 416 с.

References

1. Kozin V.Z., 2009. *Issledovanie rud na obogatimost'* [Ore enrichment testing]. Ekaterinburg: Izd-vo UGGU, 380 p.
2. Bulgakov A.G., Dyba V.P., Skibin G.M., 2011. *Mekhanika gruntov v reshenii geotekhnicheskikh zadach* [Soil mechanics in solving geotechnical problems]. Novocherkassk: Nauka. Obrazovanie. Kul'tura, 326 p.
3. Belyakov Yu.I., 1983. *Proektirovanie ekskavatornykh rabot* [Designing of excavation works]. Moscow: Nedra, 349 p.
4. Drukovanyi M.F., Tartakovskii B.N., Vishnyakov V.S., Efremov E.I., 1974. *Vliyanie drobleniya porod na effektivnost' tekhnologicheskikh protsessov otkrytoi razrabotki* [Impact of rock crushing on the efficiency of open-pit mining processes]. Kiev: Naukova dumka, 268 p.
5. Kantemirov V.D., 2011. *Perspektivy ispol'zovaniya moshchnykh ekskavatorno-avtomobil'nykh kompleksov pri osvoenii novykh syr'evykh baz* [Prospects of using powerful excavator-automobile complexes in the development of new raw material bases]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', Otd. vyp. № 11. Problemy nedropol'zovaniya*, P. 383-387.
6. Mikhailov A.G., 2002. *Proektirovanie parametrov vzryvnykh rabot na kar'erakh* [Designing parameters of blasting operations at quarries]. Yakutsk: YAF Izd-va SO RAN, 268 p.
7. Komashchenko V.I., Noskov V.F., Lebedev Yu.A., 1995. *Burovzryvnye raboty: Uchebnik dlya vuzov* [Drilling and blasting operations: A textbook for universities]. Moscow: Nedra, 413 p.

8. Kantemirov V.D., 2014. Tekhnologicheskie osobennosti osvoeniya novykh syr'-evykh baz [Technological features of the development of new raw materials base]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 6, P. 369 – 373.

9. Kantemirov V.D., Titov R.S., Yakovlev A.M., 2019. Analiz ekspluatatsionnykh pokazatelei gornodobyvayushchego oborudovaniya vedushchikh zhelezorudnykh kar'eroi Ros-sii [Analysis of operational indicators of mining equipment of leading iron ore quarries in Russia]. Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal, № 2, P. 40-50, DOI: 10.21440/0536-1028-2019-2-40-50.

10. Kutuzov B.N., Belin V.A., 2012. Proektirovanie i organizatsiya vzryvnykh rabot [Design and organization of blasting operations]. Moscow: Izdatel'stvo «Gornaya kniga», 416 p.