

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АВТОТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ

Дамрин М.Е.

Государственный университет управления, Москва

Ключевые слова: перевозка руды, экскаватор, самосвал, открытый карьер, топливная эффективность, уклон дороги, простой техники.

Аннотация. По итогам обработки и анализа данных по эксплуатации горной техники (добычные комплексы разных типоразмеров в составе экскаватор и самосвалы), задействованной на добыче и перевозке руды и вскрышных пород на открытом карьере обнаружены и предложены способы повышения эффективности организации работы за счет улучшения диспетчеризации, оптимизации типоразмера используемой техники, повышение времени полезного использования экскаваторов, снижения времени погрузки самосвалов, снижение удельного расхода топлива за счет оптимизации профиля автодороги. Получены и проанализированы положительные результаты внедрения предложенных усовершенствований и обозначены дальнейшие направления ведения работ по повышению производительности работы добычных комплексов. Актуальность работы связана с большим экономическим эффектом от повышения эффективности добычных работ по причине высокой удельной доли этих затрат в себестоимости добычи полезных ископаемых.

EVALUATION OF EFFICIENCY AND INCREASE OF PERFORMANCE OF MINING EQUIPMENT FLEET FOR OPEN PIT MINE OPERATIONS

Damrin M.E.

State University of Management, Moscow

Keywords: ore transportation, shovel, haulage trucks, open pit, fuel efficiency, road gradient, equipment downtime.

Abstract. Based on the interpretation and analysis of the actual data of the mining fleet performance (mining units of different capacity consisting of a shovel and trucks) during ore and waste rock mining and transportation activities at an open pit mine development, opportunities to increase efficiency of mining operations were identified and proposed on the basis of improvements of traffic control, optimizing size of equipment used, increasing time of shovel utilization, decreasing truck fuel consumption due to optimization of road profile. Upon implementation of the proposed initiatives, positive results have been received and analyzed, and areas for further efficiency improvements of mining fleet operations were proposed. The importance of the thesis relates to considerable economic benefits arising from increasing efficiency of the mining operations due to a significant portion of the mining costs in the mineral resources unit production costs.

Введение

В настоящей работе проведен анализ путей оптимизации работы добычных комплексов (экскаватор и автосамосвалы), задействованных при транспортной системе разработки месторождений полезных ископаемых, на фактическом примере действующего предприятия по добыче и переработке медной руды, предложены и проведены мероприятия по повышению эффективности работы, получены и проанализированы результаты внедрения усовершенствований, обозначены дальнейшие направления ведения работ по повышению производительности работы добычных комплексов.

Целью исследования является оценка и комплексное повышение эффективности организации перевозки навалочных грузов автомобильным транспортом в горнодобывающей промышленности.

Объектом исследования являются производственные процессы по добыче и транспортировке горной массы. Предметом исследования является организация работ по погрузке автосамосвала, перевозке горной массы, разгрузке самосвала, а также определение оптимальных типоразмеров используемой техники и эксплуатационных параметров транспортировочных путей.

Актуальность работы связана с тем, что удельный вес затрат на выемочно-погрузочные работы в общих суммарных затратах на единицу объема горной массы для открытых горных работ при работе с внешним отвалом составляют в среднем 15-40% [1], что в объемах среднего ГОКа составляет сотни миллионов рублей затрат в год. В этой связи, даже небольшое повышение эффективности ведения этих работ, создаст экономию в десятки миллионов рублей в год или сотни миллионов рублей за период отработки карьера. Кроме того, снижение величины удельных затрат отработки месторождения позволит понизить бортовое содержание добываемых запасов [2] и вовлечь в рентабельное производство руды с низким содержанием полезного ископаемого, которые иначе попали бы в отвал, что полностью соответствует современному подходу рационального использования недр и охраны окружающей среды [3].

Материалы и методы

Разработка месторождения меди нагорно-глубинного типа ведется открытым способом по углубочной системе разработки с внешним отвало-образованием: медная руда вывозится на перегрузочный рудный склад для шихтования и дальнейшей транспортировки на фабрику, а вскрыша транспортируется во внешний отвал. Вскрышные породы и руда предварительно подготавливаются к выемочно-погрузочным работам разрыхлением буровзрывным способом. Расположение техники в карьере и направления перемещения горных пород на момент проведения исследования представлены на рисунке 1.



Рис. 1. Расположение техники в карьере

Работы по добыче руды проводятся двумя добычными комплексами одновременно на двух горизонтах: 1) Komatsu PC2000-8 ВН (экскаватор) в связке с Komatsu HD785-7 (самосвал) и 2) CAT 6018 (экскаватор) в связке с CAT 777F (самосвал).

Для оценки эффективности работы добычных комплексов были проведены натурные замеры скорости погрузки, времени простоев, времени затраченного на подготовку уступа и на вспомогательные процедуры экскаваторов, скорости движения самосвалов, расхода топлива и объема перевезенных грузов. Полученные результаты после статистической обработки сравнивались с оптимальными для рассматриваемой техники для выявления неэффективных процессов для последующей оптимизации. Проведен анализ производительности работы самосвалов при различных уклонах дорожного полотна для выявления функциональной связи между ними и рассчитан оптимальный уклон дорожного полотна для достижения максимальной производительности самосвалов при минимальном расходе топлива.

Теория и расчет. Исследование эффективности работы экскаваторов

Выбор используемой горной техники предприятие первоначально производит на стадии подготовки проекта отработки месторождения [4] и обоснования системы отработки на основе комплекса параметров: годовая производительность карьера по руде и горной массе, геометрия рудных тел, высота рабочего уступа, дальность транспортировки руды и вскрыши

и т.д. [5]. В процессе обработки месторождения эти параметры будут постоянно меняться по причине изменения макроэкономики и очередности обработки запасов, и уточнения геологического строения месторождения, что неизбежно приведет к изменению параметров карьера, типоразмера техники и особенно торговых марок производителей. Для достижения максимальной эффективности предприятие должно постоянно проводить мониторинг всех производственных процессов с целью повышения эффективности, чем зачастую занимаются специально созданные службы Continual Improvement.

Для эффективного ведения горных работ на основании многолетних наблюдений, рекомендуются следующие параметры работы погрузочного комплекса [6]:

- количество ковшей экскаватора, уместающихся в кузов самосвала, – 4-5;
- угол поворота платформы экскаватора от забоя до погрузки самосвала – 90°.

На руднике добычные комплексы организованы на базе из экскаваторов Komatsu PC2000-8 ВН (в связке с пятью самосвалами Komatsu HD785 и CAT 777F) и Caterpillar CAT 6018 (в связке с четырьмя самосвалами CAT 777F). Характеристики работы экскаваторов PC2000-8 ВН и CAT 6018, определенные на основе паспортных данных и проведенного хронометража, приведены в таблице 1.

Табл. 1. Эксплуатационные характеристики экскаваторов

Параметр	Komatsu PC2000-8	CAT 6018
Общее время замеров	23 мин 04 сек	45 мин 19 сек
Емкость ковша	12 м ³	10 м ³
Расчетный коэффициент наполнения ковша	1,1	0,9
Средний угол поворота платформы	90	70
Плотность материала	2,2	2,2
Всего ковшей	4	6
Среднее время цикла	27 сек	23
Среднее время погрузки самосвала	1 мин 40 сек	2 мин 10 сек

В результате фактически выполненных замеров работы экскаваторов получены следующие результаты:

- среднее время цикла – 27 сек;
- среднее количество ковшей – 4;
- среднее время загрузки самосвалов – 1,43 мин (Komatsu HD 785) и 1,41 мин (CAT 777D).

После выбора типоразмера основным критерием эффективной работы экскаватора является коэффициент его использования [7]. На практике эта величина рекомендуется на уровне не ниже 75% [8].

По итогам проведенных замеров работа экскаватора, связанная непосредственно с погрузкой горной породы, составляет от 49% (для PC2000-8) до 63% (для CAT 6018) (табл. 2), что существенно ниже порога в 75% (рис. 2).

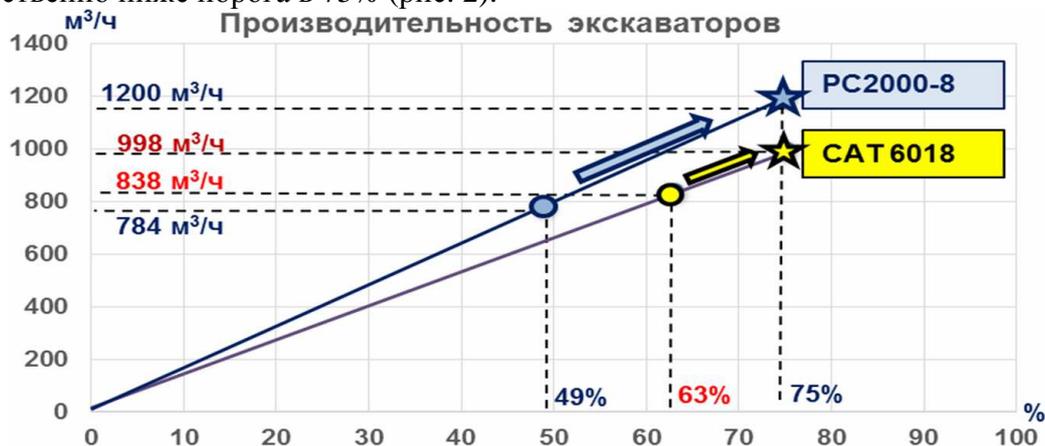


Рис. 2. Оценка производительности работы экскаваторов

Табл. 2. Распределение занятости экскаватора

Параметр	PC2000-8	CAT 6018
Погрузка	49,4%	62%
Обработка уступа	18,6%	16%
Очистка		9%
Передвижение	3,6%	3%
Ожидание	16,8%	9%
Простой	11,6%	

Исследование эффективности работы самосвальной техники

Следующим этапом работы было исследование эффективности организации транспортировки руды самосвалами CAT 777F и HD785-7.

Эффективность работы самосвала оценивается по следующим параметрам [9]:

- производительность, т/мес;
- топливная эффективность, л/т.км.

Расстояние транспортировки руды от забоя до рудного склада составило 1,3 км. Профиль дороги и средняя скорость движения по проведенным замерам представлены на рисунке 3.

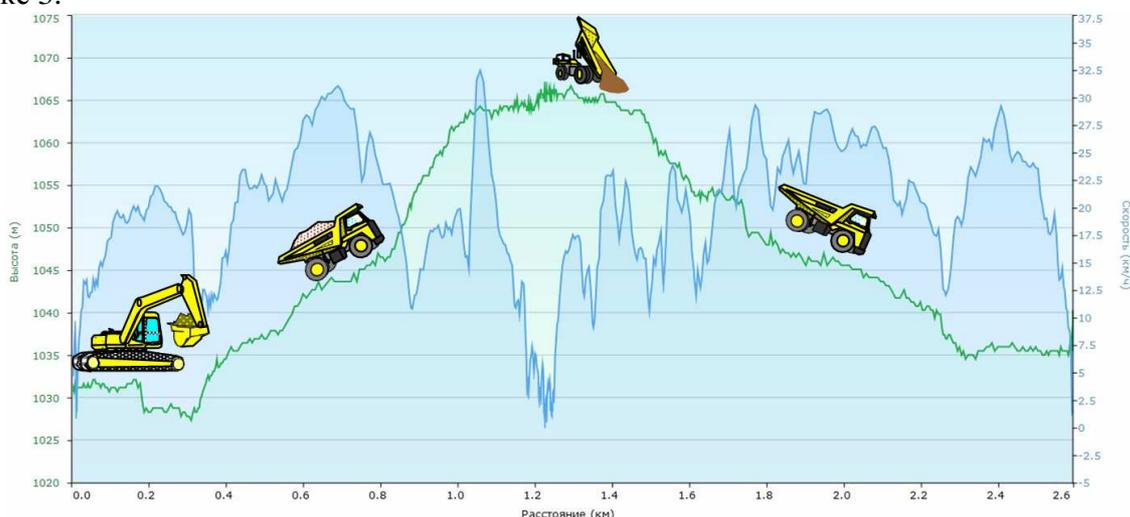


Рис. 3. Характеристики пути транспортирования руды самосвалами CAT 777F

Средняя скорость движения колеблется от 7,5 км/ч (на подъеме) до 30 км/час и является вполне удовлетворительной для дорог 2-3 класса.

Усредненные результаты замеров параметров движения CAT 777F приведены в таблице 3.

Табл. 3. Результаты замеров параметров движения самосвалов CAT 777F

Параметр	Груженный	Порожний
Расстояние	1,2 км	1,3 км
Время в пути	5 мин 22 сек	4 мин 03 сек
Скорость сред (макс)	15,8 км/час (33 км/час)	17,5 км/час (33 км/час)
Средний уклон	2,9 %	2,3 %
Перепад высот	38 м	38 м

Хронометраж работы самосвала Komatsu HD785-7 представлен на рисунке 4.

Анализ хронометража показывает, что организация работ на карьере в июне-июле изменилась по сравнению с апрелем-маем в соответствии с календарем отработки месторождения: разноска бортов, вскрытие рудных блоков, подготовкой автомобильных дорог и фронта добычных работ, что привело к неэффективному использованию горной

техники в карьере: порожний простой увеличился до 21-22% (июнь) с 15-16% (май). Одновременно время на погрузку самосвалов уменьшилось. В дальнейшем снижение доли простоя порожним в июне, июле с 21-22% до ранее достигнутых значения апреля в 16% позволит повысить среднюю производительность самосвала на +3% при тех же операционных затратах.

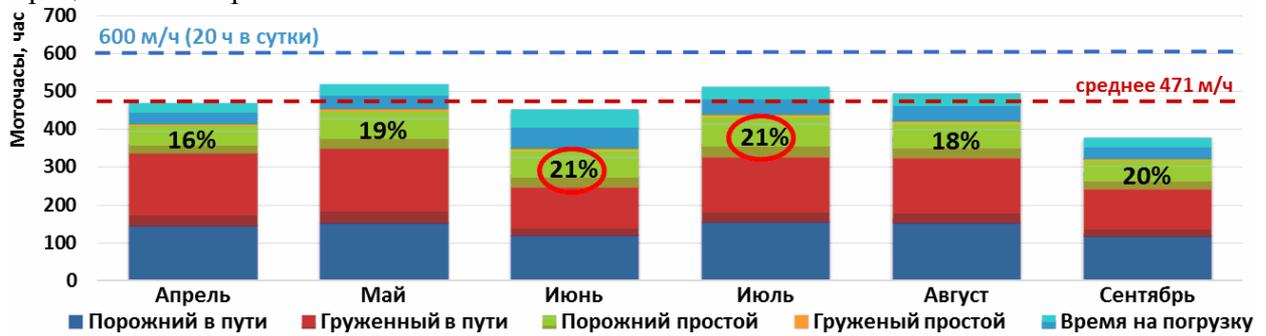


Рис. 4. Месячная наработка Komatsu HD785, бортовой номер 91

Моделирование производительности самосвалов в зависимости от уклона дорожного полотна

Для повышения топливной эффективности и безопасности организации движения самосвалов на горных работах большое значение имеет конструкция дорожного полотна и маршрут перевозки. Проектирование автомобильных дорог в карьере осуществляется на стадии подготовки проекта отработки месторождения [10]. Автомобильные дороги составляют существенную часть горно-капитальных затрат. Основными параметрам автомобильных дорог, влияющими на объем горных работ для их строительства, являются их ширина и уклон (или подъем). Ширина автомобильной дороги напрямую зависит от типоразмера (грузоподъемности) используемых автосамосвалов, типа покрытия дороги и организации движения (одностороннее или двустороннее) [11]. Расчет ширины автодороги строго регламентирован правилами безопасного движения [12]. Величина уклона является важнейшей характеристикой дороги с точки зрения операционных затрат. С его увеличением сокращается расстояние транспортирования, уменьшается длина и объем наклонных горных выработок для строительства дорог. С другой стороны, снижается скорость движения автосамосвалов, пропускная способность и безопасность движения, особенно в зимний период. В целом, рекомендуется уклон 70-80‰ (метров подъема на 1 км пути) [13].

На карьере было проведено моделирование производительности автотранспортных перевозок т/км-ч в зависимости от уклона автодороги при неизменном трении качения (рис. 5).



Рис. 5. Моделирование производительности в зависимости от уклона

Результаты и обсуждение

По итогам проведения хронометража работы экскаваторов было выявлено, что работа обоих экскаваторов далека от оптимальной: работа, связанная непосредственно с погрузкой горной породы, составляет от 49% до 63%, что ниже оптимального порога в 75% [14].

Увеличить коэффициент использования экскаватора можно в первую очередь за счет [15]:

- уменьшения простоя (9-11%);
- изменения схемы отработки уступа путем добавления бульдозера, который будет вести работы по очистке подошвы уступа (9%).

При анализе работы самосвалов были выявлены возможности увеличения производительности и топливной эффективности каждой единицы техники за счет пересмотра организации перевозки грузов. Для улучшения показателей времени погрузки самосвала была модернизирована схема погрузки и предложена одновременная погрузка двух самосвалов на два подъезда, что позволило добиться снижения время погрузки до 1,76-1,92 минуты на самосвал. Одновременно была изменена схемы транспортировки, что позволило уменьшить плечо откатки и повысить производительность работы самосвалов со 120 тыс.тонн в месяц до 220 тыс.тонн. Помесячные расчёты производительности и топливной эффективности самосвала Komatsu HD785-7 представлены на рисунках 6, 7.



Рис. 6. Производительность Komatsu HD785, бортовой номер 92

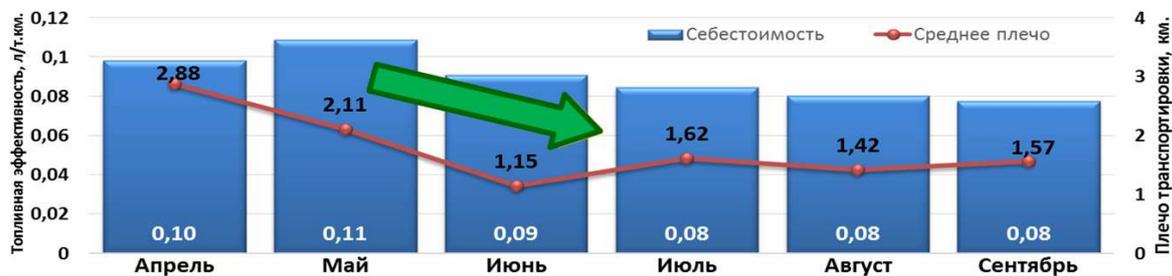


Рис. 7. Топливная эффективность Komatsu HD785, бортовой номер 91

За время наблюдений было отмечено стабильное улучшение топливной эффективности с 2,88 л/т.км до 1,15-1,57 л/т.км. Основным факторами являются уменьшения плеча отката (май-сентябрь) и общее улучшение организации работы.

При исследовании функциональной зависимости производительности автотранспортных перевозок от уклона автодороги было установлено, что при уменьшении уклона с 12% до 8% длина пути увеличивается с 833 м до 1250 метров, при этом производительность автосамосвалов также увеличивается за счет увеличения скорости движения и маневрирования (рис. 8).

Необходимо отметить, что при этом не анализировалось изменение капитальных затрат на строительство автодорог при увеличении ее длины.

По результатам расчета производительности наибольший грузооборот (531 ткм/ч) достигается комплексом Komatsu PC2000-8B + Komatsu HD785-7 при следующих условиях:

- уклон дороги 8%;
- сопротивление качению 3%;
- расстояние 1250 м.

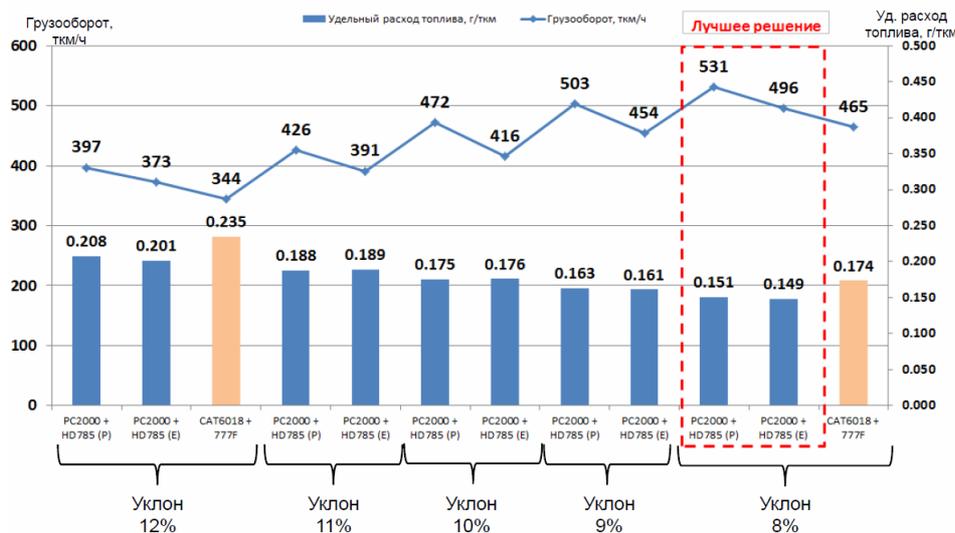


Рис. 8. Влияние уклона дороги на грузооборот (ткм/ч) и удельный расход топлива (г/ткм)

Выводы и рекомендации

По итогам фактически проведенных измерений и моделирования процессов на горнорудном предприятии были выявлены комплексные недостатки в организации работы добычных комплексов, касающиеся прежде всего больших простоев в работе экскаваторов, невысокой производительностью и топливной эффективностью самосвалов, неоптимальным профилем дорожного полотна. Выявленные неэффективности носили комплексный характер, затрагивали все процессы горных работ и требовали научно-практического подхода к их устранению [16].

Предложен комплекс мероприятий по повышению эффективности работы горной техники, прежде всего касающиеся организации ее работы. Внедрение предложенных усовершенствований заняло 4 месяца, по итогам которых были достигнуты следующие результаты:

- повышена эффективность работы добычного комплекса: на базе экскаватора PC2000 с 49% до 68%; на базе экскаватора САТ 6018: с 62 до 71%;
- увеличен коэффициент наполнения ковша экскаватора САТ 6018 с 0,9 до 1,0;
- применена транспортная схема одновременной погрузки двух самосвалов на два подъезда, что привело к уменьшению время погрузки с 2,7 до 1,76 минуты на самосвал;
- проведена работа по уменьшению уклона дороги и водосточных канав до 8% на доступных участках, что по расчетам соответствует минимуму удельной себестоимости грузоперевозок.

Следующий этап работы направлен на анализ удельных затрат на ремонт и сервисное обслуживание горной техники, затрат на персонал (какая техника требует более высокой квалификации рабочих, соответственно, и более высоких расходов на з/п), капитальные затраты на приобретение техники и сроки службы (амортизация) за весь период отработки месторождения для разных типоразмеров и брендов используемой техники с целью установления функциональной зависимости удельной себестоимости добычи от выбора типоразмера и бренда горной техники для принятия управленческих решений на стадии оценки инвестиционного проекта [17].

Список литературы

1. Репин Н.Я., Репин Л.Н. Процессы открытых горных работ. – М.: Горная книга, 2015. – 518 с.
2. Бринчук М.М. Экологическое право. – М.: ЮНИТИ, 2015. – 368 с.
3. Дубовик О.Л. Экологическое право РФ. – М.: Омега-Л, 2014. – 297 с.
4. Hickson R.J., Owen T.L. Project management for mining: handbook for delivering project success. – SME, 2015.
5. SME Mining Engineering Handbook / Edited by P. Darling, 3rd edition. – Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2011.

6. Mine Managers' Handbook / Edited by K. Burt, C. Lockyer, K. McShane, O. Tet Fong. – Australian Institute of Mining and Metallurgy, 2012.
7. Репин Н.Я., Репин Л.Н. Процессы открытых горных работ. Часть 3. Перемещение и складирование горных пород: Учебное пособие. – М.: Горная книга, 2013. – 221 с.
8. Дополнения и изменения Единых норм и расценок на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы (ЕНиР) // Сборник Е2. "Земляные работы" Выпуск 1. "Механизированные и ручные земляные работы" (утв. постановлением Госстроя СССР и Госкомтруда СССР от 18 декабря 1990 г. NN 109/452).
9. Трейман М.Г., Копанская А.А. Анализ технико-экономических показателей транспортных систем горнообогатительных комплексов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Экономика и экологический менеджмент. – 2020. – № 4. – С. 17-28.
10. Ракишев Б.Р. Вскрытие карьерных полей и системы открытой разработки: Учебник. – Алматы: КазНТУ, 2012. – 322 с.
11. Типовые технологические схемы ведения горных работ на угольных разрезах. – Челябинск: НИИОГР, 1991. – 350 с.
12. Hustrulid W., Kuchta M., Martin R. Open pit mine planning & design. – CRC Press.
13. Репин Н.Я., Репин Л.Н.. Выемочно-погрузочные работы: Учебное пособие. – 2-е изд. – М.: Горная книга, 2012. – 267 с.
14. Яковлев В.Л., Тарасова П.И., Журавлев А.Г., Фурин В.О., Ворошилов А.Г., Тарасов А.П., Февелев Е.В. Новый взгляд на карьерный автомобильный транспорт // Известия вузов. Горный журнал. – 2011. – №6. – С. 34-37.
15. Коптев В.Ю. Структурная оптимизация транспортных систем горнодобывающих предприятий // Проблемы современной науки и образования. – 2016. – №3. – С. 121-123.
16. Daly A., Valacchi G., Raffo J.D., 2022. Recent Trends of Innovation in the Mining Sector. Global challenges for innovation in mining industries. Cambridge University Press. [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cambridge.org/core>.
17. Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр / Под редакцией академика РАН К.Н. Трубецкого. – М.: ИПКОН РАН, 2022. – 404 с.

References

1. Repin N.Ya., Repin L.N. Processes of open pit mining operations. – М.: Mining Book, 2015. – 518 p.
2. Brinchuk M.M. Environmental Law. – М.: YuNITI, 2015. – 368 p.
3. Dubovik O.L. Environmental Law of Russia. – М.: Omega-L, 2014. – 297 p.
4. Hickson R.J., Owen T.L. Project management for mining: handbook for delivering project success. – CME, 2015.
5. SME Mining Engineering Handbook / Edited by P. Darling, 3rd edition. – Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2011.
6. Mine Managers' Handbook / Edited by K. Burt, C. Lockyer, K. McShane, O. Tet Fong. – Australian Institute of Mining and Metallurgy, 2012.
7. Repin N.Ya., Repin L.N. Processes of open pit mining operations. Part 3. Haulage and storage of rock: Textbook. – М.: Mining Book, 2013. – 221 p.
8. Amendments and revisions of the United quotas and rates for construction, installation and repair works (EN&P) // Digest E2. "Earthwork" 1st ed. "Powered and manual earthworks" (approved by decree of the State Committee for Construction of the USSR and the State Committee for Labour of the USSR on December 18, 1990, NN 109/452).
9. Treiman M.G., Kopanskaya A.A. Analysis of technical and economic characteristics of haulage systems of the mining fleet // Scientific magazine NIU ITMO. Issue Economics and environmental management. 2020, no. 4, pp. 17-28.
10. Rakishev B.R. Development of open-pit fields and systems of open-pit mining: Textbook. – Almaty: KazNTU, 2012. – 322 p.
11. Typical technological methods of mining at coal strip mines. – Chelyabinsk: NIIOGR, 1991 – 350 p.
12. Hustrulid W., Kuchta M., Martin R. Open pit mine planning & design. – CRC Press, 2013.
13. Repin N.Ya., Repin L.N. Extraction and Loading Works: Textbook. – 2nd edition. – М.: Mining Book, 2012. – 267 p.
14. Yakovlev V.L., Tarasova P.I., Zhuravlev A.G., Furin V.O., Voroshilov A.G., Tarasov A.P., Fevelev E.V. A fresh approach to the mining fleet // News of the universities. Mining Journal. – 2011. – No. 6. – P. 34-37.
15. Koptev V.Yu. Structural optimization of haulage systems of mining companies // Problems of modern science and education. 2016, no. 3, pp. 121-123.
16. Daly A., Valacchi G., Raffo J.D., 2022. Recent Trends of Innovation in the Mining Sector. Global challenges for innovation in mining industries. Cambridge University Press [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.cambridge.org/core>.
17. Problems and prospects of integrated development and conservation of the Earth's interior / Edited by the member of the Russian Academy of Sciences K.N. Trubetsky. – М.: IPKON RAS, 2022. – 404 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Дамрин Михаил Евгеньевич – аспирант	Damrin Mikhail Evgenievich – postgraduate student
mikhaildamrin@yandex.ru	

Получена 04.07.2024