



Обоснование угла откоса уступа и уклона съезда карьерной автодороги при применении беспилотного транспорта

Д.Н. Лиготский, Н.А. Долгушин ✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ s235068@stud.spmi.ru

Резюме: Увеличение глубины карьера создает ряд вызовов для горнодобывающей отрасли. При разработке нижних горизонтов возникает проблема концентрации вредных газов и, как следствие, приводит к дополнительным затратам и увеличению времени отработки. Одним из возможных решений становится применение беспилотных самосвалов, позволяющих обеспечить безопасность ведения работ, повысить экономическую эффективность разработки месторождения и скорректировать параметры карьера. В статье рассматривается проблема оптимизации параметров карьера при использовании беспилотной техники в условиях разработки карьеров с углубкой. Обосновано увеличение угла откоса уступа и уклона карьерных съездов, что приводит к корректировке объемов вскрышных пород, извлекаемых из недр на участке борта, где проходит схема вскрытия. Доказано линейное влияние угла откоса уступа на угол откоса борта. Рассчитан коэффициент запаса устойчивости для магматической и осадочной пород. Показано, что нормативное снижение коэффициента запаса устойчивости при использовании беспилотной техники позволяет увеличить угол откоса уступа на 8 град. На основе тягового расчета установлено, что максимально допустимый уклон съезда при применении беспилотных машин достигает 105%. Определено взаимное влияние уклона съезда и угла откоса уступа на объем горной массы. Установлено, что корректировка рассматриваемых параметров позволяет сократить объем горной массы, извлекаемой из недр на участке борта, где проходит схема вскрытия, до 34%, и, как следствие, уменьшить средний коэффициент вскрыши, что приводит к возможности дополнительно извлечь полезное ископаемое.

Ключевые слова: беспилотная техника, роботизированный самосвал, уклон съезда, угол откоса уступа, борт карьера, открытые горные работы

Для цитирования: Лиготский Д.Н., Долгушин Н.А. Обоснование угла откоса уступа и уклона съезда карьерной автодороги при применении беспилотного транспорта. *Горная промышленность*. 2026;(4S):92–98. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-92-98>

Justification of the bench slope angle and the slope of the access ramp when using unmanned vehicles

D.N. Ligotskiy, N.A. Dolgushin ✉

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ s235068@stud.spmi.ru

Abstract: Increasing depths of open-pit mines poses a number of challenges for the mining industry. Concentration of harmful gases is created when developing the lower mine levels, which leads to additional costs and longer mining time. One of the possible solutions is to use unmanned dump trucks to ensure the safety of operation, increase the economic efficiency of mining, and adjust the open-pit mine parameters. The article discusses the problem of optimizing the open-pit mine parameters when using unmanned vehicles in the conditions of surface mine development with a push-back. An increase in the bench slope angle and the slope of the access ramps is justified, which leads to an adjustment in the volume of overburden removed from the wall section where the mine development takes place. The linear character of the bench slope angle effect on the wall slope angle is proved. The safety factor is calculated for igneous and sedimentary rocks. It is shown that the normative reduction of the safety factor when using unmanned vehicles makes it possible to increase the bench slope angle up to 8 degrees. Traction calculations helped to establish that the maximum allowable ramp slope can be up to 105% when using unmanned vehicles. The mutual effects of the ramp slope and the bench slope angle on the volume of the rock mass is determined. It is established that adjustment of these parameters makes it possible to reduce the volume of the rock mass removed from the wall section where the mine



development takes place by up to 34%, which results in a reduction of the average stripping coefficient, and creates the possibility of extracting additional volumes of minerals.

Keywords: unmanned vehicles, autonomous dump truck, access ramp slope, bench slope angle, open pit wall, surface mining

For citation: Ligotsky D.N., Dolgushin N.A. Justification of the bench slope angle and the slope of the access ramp when using unmanned vehicles. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):92–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-92-98>

Введение

В России всё более актуальной становится проблема увеличения глубины карьеров. Разработка глубоких горизонтов усложняет вентиляцию и формирует риск загазованности атмосферы. Работа в таких условиях требует применения СИЗ, повышает затраты на извлечение, снижает производительность и может приводить к нерациональному освоению недр [1; 2]. Одним из возможных решений является применение беспилотной техники при разработке глубокозалегающих участков рудных тел, поскольку минимизация присутствия людей в опасной производственной зоне позволяет снизить производственные риски [3; 4].

Автоматизация горных предприятий, в том числе внедрение беспилотного транспорта, является одним из ведущих направлений современной горнодобывающей промышленности, связанных с повышением безопасности [5–7], производительности и экономической эффективности разработки месторождений [8–10]. Переход от пилотируемых выемочно-погрузочных и транспортных средств к автономным комплексам подтверждается растущим интересом промышленности и научного сообщества. В России развитие таких решений началось с внедрения систем управления горнотранспортным комплексом «Карьер» [11; 12], позднее трансформированных в систему «Умный карьер» [13; 14]. Одним из первых примеров практического применения дистанционно управляемой техники стала доработка нижних горизонтов алмазоносного карьера «Удачный» [15; 16], где вывод персонала из опасной зоны позволил обеспечить безопасность работ и увеличить уклоны съездов до 240‰ [17; 18].

Развитие отечественной беспилотной техники связано с решениями «КамАЗ» и VIST Robotics, включая модель «Юпитер 30», ориентированную на карьеры нерудных строительных материалов. Роботизированные машины также разрабатывает БелАЗ: модель БелАЗ-7513R, созданная на базе БелАЗ-75131 [19], способна работать в дистанционном и автономном режимах, используя датчики, радары и лидары для оценки дорожной обстановки. Промышленная эксплуатация БелАЗ-7513R ведется на разрезе «Абаканский» предприятия «СУЭК Хакасия» [20]. На международном уровне первые испытания беспилотных моделей Caterpillar проводились еще в 1980-х годах, а дальнейшее развитие автономного транспорта связано с промышленными проектами Caterpillar и Komatsu, оснащенными системами пространственной ориентации и управления [21; 22]. Komatsu внедрила автономные решения совместно с CODELCO и Rio Tinto, а также представила машину IAHV без кабины оператора [23]. В 2024 г. компания поставила автономные самосвалы 930E на рудник Los Bronces [24]. Усиление конкуренции связано и с выходом китайских производителей XCMG и Zoomlion [25].

Применение беспилотной техники обеспечивает повышение коэффициента использования машин за счет исключения обеденных перерывов, пересменок и повы-

шения качества диспетчеризации [26; 27]. Кроме того, беспилотные технологии позволяют снизить износ шин, расход горюче-смазочных материалов, затраты на обслуживание и фонд оплаты труда [28]. Однако их значение не ограничивается эксплуатационной эффективностью: одним из ключевых преимуществ является возможность изменения конфигурации карьера. В частности, применение беспилотного транспорта позволяет пересматривать допустимые значения коэффициента запаса устойчивости, угла откоса уступа и уклона карьерного съезда. В настоящей работе приводится обоснование рациональных значений уклона съезда и угла откоса уступа при применении беспилотного карьерного транспорта, а также оценивается их влияние на параметры борта и объемы вскрышных работ.

Результаты и их обсуждение

При изучении нормативной базы был использован аналитический метод, который позволил выявить возможность снижения коэффициента запаса устойчивости с 1,5 до 1,2 при использовании беспилотной техники. На основе того же метода были собраны данные о применении роботизированных самосвалов и их влиянии на параметры отработки месторождений. В работе был произведен ряд расчетов для выявления коэффициентов запаса устойчивости, углов откоса уступа и борта, тяговых характеристик. Для сопоставления полученных по расчетам данных был применен сравнительный метод, позволяющий проанализировать влияние рассматриваемых параметров.

В первую очередь требуется оценить влияние параметров карьера на угол откоса борта.

Угол откоса борта карьера находится по формуле:

$$\beta = \arctg \left(\frac{1}{\operatorname{ctg} \alpha + a \left(\frac{1}{h} - \frac{1}{H} \right)} \right), \quad (1)$$

где a – ширина предохранительной бермы, м; h – высота рабочего уступа, м; H – глубина карьера, м; α – угол откоса уступа, град; β – угол откоса борта карьера, град.

По формуле (1) произведены расчеты, отражающие влияние значений угла откоса уступа и глубины карьера на угол откоса борта карьера при фиксированной ширине транспортной бермы равной 30 м (табл. 1).

Анализ полученных данных показывает, что величина угла откоса конечного борта увеличивается на 7–8% при увеличении угла откоса уступа на 5 град (см. табл. 1). При увеличении глубины карьера происходит выполаживание, то есть уменьшение угла откоса борта. Кроме того, согласно работе [29] при применении беспилотной техники возможно сокращение обочин дороги, что также способно оказать влияние на величину угла откоса борта. С целью обеспечения мер безопасности при автономном режиме работы техники высота предохранительного вала будет увеличена с половины диаметра колеса до полной его высоты, что приведет к увеличению основания вала и фактически нивелирует преимущества, получаемые при

Таблица 1

Сводная характеристика аварийности на рудниках, разрабатывающих легкорастворимое минеральное сырье

Угол откоса уступа, град	Глубина карьера, м					
	50	100	150	200	250	300
60	50,97	49,28	48,74	48,47	48,31	48,20
65	55,02	53,14	52,54	52,24	52,06	51,94
70	59,15	57,08	56,42	56,09	55,89	55,76
75	63,38	61,13	60,41	60,05	59,83	59,69
80	67,72	65,31	64,53	64,14	63,91	63,76
85	72,21	69,65	68,82	68,41	68,16	67,99

Table 1

Summary characteristics of accidents in mines extracting readily soluble raw materials

Таблица 2

Физико-механические свойства пород, принимаемые к расчету устойчивости

Порода	Удельный вес, кН/м ³	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град
Кимберлит	26150	800	34,5
Известняк	2520	745	37,7

Table 2

Physical and mechanical properties used for the stability calculation

сокращении обочины, однако поддержит безопасность проведения горных работ.

Важным параметром при проектировании карьера является коэффициент запаса устойчивости [30], влияющий напрямую на угол откоса борта и, как следствие, на объемы извлекаемой горной массы [31]. Согласно приказу Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору¹ при применении безлюдной технологии коэффициент запаса устойчивости может быть снижен с 1,5 до 1,2. Применение беспилотной техники не меняет свойства породы, однако позволяет изменить технологические параметры карьера. На основе физико-механических свойств пород (табл. 2), а также изменяющихся глубины карьера и угла откоса уступа в ПО Slide рассчитан коэффициент запаса устойчивости для кимберлита (рис. 1) и известняка (рис. 2).

Анализируя рис. 1 и 2, можно сделать вывод о том, что преимущества внедрения беспилотной техники, связанной с возможностью корректировки угла откоса уступа, становится целесообразным на глубине свыше 175 м для кимберлита и свыше 140 м для известняка. Данная корректировка позволяет изменять угол откоса уступа до 8 град, что влияет на угол откоса борта, как было показано в табл. 1.

Для обоснования величины уклона съезда при применении беспилотного транспорта был проведен расчет максимального уклона по сцеплению и устойчивости. Стоит отметить, что вследствие изменения конструкции двигателя и корпуса беспилотных машин происходит изменение ряда коэффициентов, учитывающихся при тяговом расче-

¹ Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов»: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13 ноября 2020 г. №439.

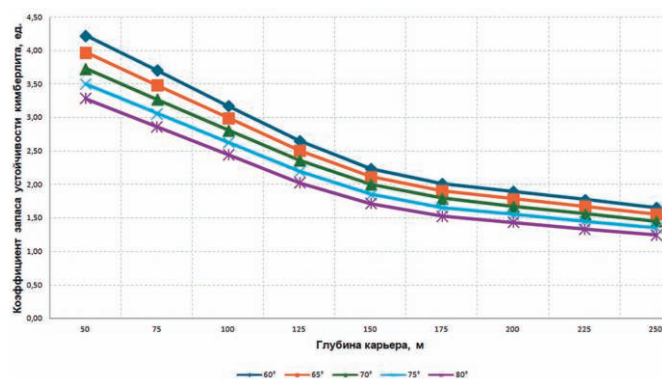


Рис. 1

Результаты расчета коэффициента запаса устойчивости кимберлита

Fig. 1

Results of calculating the safety factor for kimberlite

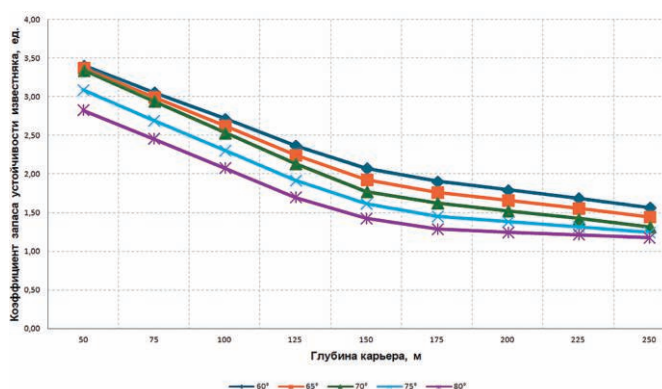


Рис. 2

Результаты расчета коэффициента запаса устойчивости известняка

Fig. 2

Results of calculating of the safety factor for limestone

те. Данные изменения возможны вследствие: использования систем антипробуксовки (контроль проскальзывания колес и корректировка крутящего момент), динамического распределения веса и коррекции движения (корректировки нагрузки на ось, мощности и тормозного усилия). Для пилотируемой машины коэффициент сцепления $\eta = 0,6$, при использовании беспилотной техники значение коэффициента $\eta = 0,7$ [31; 32]. Согласно расчетам максимальный уклон по сцеплению при использовании пилотируемой техники – 31°, а при использовании беспилотной техники – 35°, то есть на 11% больше. Максимальный угол по устойчивости равен 37°.

Далее был проведен тяговый расчет, при котором: коэффициент сопротивления качению f для пилотируемых машин в среднем составляет 0,04, для беспилотных $f = 0,03$ – вследствие увеличения сцепления, исключения резких стартов и остановок, избегания неровностей на дороге [33]. КПД трансмиссии, отношение полезной мощности, передаваемой от двигателя на колеса к мощности, вырабатываемой двигателем при управлении человеком, дает показатель $\eta_t = 0,75$, а при применении роботизированной техники $\eta_t = 0,87$ за счет использования интеллектуальной системы управления (корректировки подачи мощности, уменьшения перегрузок и использования электрических трансмиссий) [34; 35]. Учитывая возможные корректировки тяговых усилий в связи применением беспилотного карьерного транспорта, произведен тяговый расчет для

Таблица 3
Тяговый расчет для
беспилотного автосамосвала
грузоподъемностью 136 т

Уклон, ‰	Силы сопротивления качению, Н	Сила тяга, Н	Сила сцепления, Н
80	262329	331532	386298
85	274253	331532	386139
90	286177	331532	385972
95	298101	331532	385795
100	310025	331532	385609
105	321949	331532	385413
110	333874	331532	385208

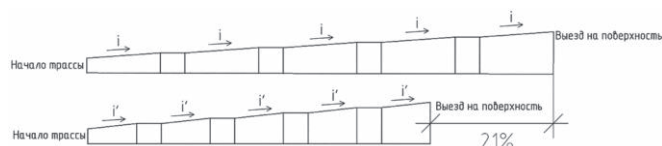


Рис. 3
Сравнение длины
транспортирования при уклоне
 $i = 80$ и $i' = 105\%$

Table 3
Traction calculation for an
unmanned dump truck with
the loading capacity of 136
tons

Fig. 3
A comparison of the haulage
distance with the slope angle
of $i = 80\%$ and $i' = 105\%$

Таблица 4
Результаты расчета изменения
объемов горной массы
вследствие корректировки
угла откоса уступа
и уклона карьерной
автодороги, тыс. м³

Угол откоса уступа, град	Уклон, ‰						
	80	85	90	95	100	105	110
60	8255	7912	7614	7352	7120	6913	6728
65	7957	7620	7328	7071	6843	6641	6459
70	7687	7356	7069	6816	6593	6395	6217
75	7437	7112	6830	6582	6363	6168	5993
80	7203	6884	6606	6362	6147	5955	5784
85	6980	6666	6393	6153	5941	5753	5585
90	6764	6455	6186	5950	5742	5557	5392

Table 4
The results of calculating
changes in the volume
of rock mass due to the
adjustment of the bench slope
angle and the access ramp
slope, thousand m³

модели БелАЗ 7513R. Основным условием тягового расчета является: сила сопротивления качению < силы тяги < сила сцепления. Аналитический тяговый расчет показал, что допустимым является уклон 109‰ (табл. 3).

Корректировка уклона карьерной автодороги сокращает расстояние транспортирования горной массы (рис. 3), что способствует сокращению времени рейса и повышению производительности. Кроме того, вследствие сокращения длины транспортирования сокращаются и объемы горной массы, извлекаемые при формировании конечных бортов карьера.

Угол откоса уступа участвует в формировании угла откоса борта карьера, который в конечном счете влияет на объем горной массы в карьере. Уклон карьерной автодороги оказывает влияние на длину транспортирования, которая, в свою очередь, влияет на объем горной массы, извлекаемой из недр на участке борта, где проходит схема вскрытия. Для расчета объемов горной массы с учетом корректировки рассматриваемых параметров было проведено моделирование в ПО Deswik. Глубина карьера 150 м, высота уступа 15 м. Результаты расчета приведены в табл. 4.

В результате расчетов установлено, что кумулятивный эффект от изменения рассматриваемых параметров выражается в снижении объема горной массы, извлекаемой из недр на участке борта, где проходит схема вскрытия, до 34% в сравнении с применением пилотируемой техники такой же грузоподъемности. Данное изменение влечет за собой дальнейшее сокращение среднеексплуатационного коэффициента вскрыши.

Заключение

В работе показано прямое влияние угла откоса уступа на угол откоса борта карьера, рассчитано допустимое изменение угла откоса уступа на 8 град при нормативном снижении коэффициента запаса устойчивости. Обосновано увеличение уклона съезда до 105‰. Оценено влияние изменения рассматриваемых параметров на объем вскрышных работ, установлено, что объем горной массы, извлекаемой из недр на участке борта, где проходит схема вскрытия месторождения, может быть уменьшен на 34%, что приведет к сокращению эксплуатационного коэффициента вскрыши и, как следствие, снижению себестоимости добычи полезного ископаемого.

Список литературы / References

- Волошина Е.А., Новоженин С.Ю., Келексаев С.К. Обоснование применения беспилотных летательных аппаратов для определения объема складов полезного ископаемого. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(11-1):305–321. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_305
Voloshina E. A., Novozhenin S. Yu., Kelekhsaev S. K. Substantiation of use of unmanned aerial vehicles in volume evaluation of mineral storages. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11-1):305–321. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_305



2. Иванов В.В., Дзюрич Д.О. Обоснование параметров технологической схемы разработки обводненных месторождений строительного песка. *Записки Горного института*. 2022;253:33–40. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.3>
Ivanov V.V., Dzyurich D.O. Justification of the technological scheme parameters for the development of flooded deposits of construction sand. *Journal of Mining Institute*. 2022;253:33–40. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.3>
3. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Economic and technological aspects of interrelation between open pit mine depth and mining transport parameters. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2020;(3):87–95. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-3-87-95>
4. Иванов С.Л., Иванова П.В., Кувшинкин С.Ю. Оценка наработки карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда в реальных условиях эксплуатации. *Записки Горного института*. 2020;242:228–233. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.2.228>
Ivanov S.L., Ivanova P.V., Kuvshinkin S.Y. Promising model range career excavators operating time assessment in real operating conditions. *Journal of Mining Institute*. 2020;242:228–233. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.2.228>
5. Gendler S.G., Stomma A.A., Ikonnikov D.A. Justification of a ventilation method for extended blind drifts using fans distributed along a discontinuous ventilation pipeline. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2026;39(11):294–956. <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.11b.21>
6. Маринин М.А., Поспехов Г.Б., Карасев М.А., Сушкова В.И. Расчетное обоснование параметров дренажного слоя в основании динамического штабеля кучного выщелачивания. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2026;(2-1):99–113. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2026/2-1/2-1_2026_99-113.pdf (дата обращения: 19.03.2026).
Marinin M. A., Pospheh G. B., Karasev M. A., Sushkova V. I. Computational justification of the parameters of the drainage layer at the base of the dynamic pile of heap leaching. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2026;(2-1):99–113. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2026/2-1/2-1_2026_99-113.pdf (accessed: 19.03.2026).
7. Фомин С.И., Говоров А.С. Стратегия формирования рабочей зоны карьеров на основе управления бортовым содержанием полезных компонентов в руде. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(11):165–179. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2024/11/11_2024_165-179.pdf (дата обращения: 19.03.2026).
Fomin S.I., Govorov A.S. Strategy of formation of operating space in open pit mines based on cut-off grade control. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(11):165–179. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2024/11/11_2024_165-179.pdf (accessed: 19.03.2026).
8. Великанов В.С. Прогнозирование нагруженности рабочего оборудования карьерного экскаватора по нечетко-логистической модели. *Записки Горного института*. 2020;241:29–36. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.29>
Velikanov V.S. Mining excavator working equipment load forecasting according to a fuzzy-logistic model. *Journal of Mining Institute*. 2020;241:29–36. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.29>
9. Виноградов Ю.И., Сергиенко Н.Н., Васильев Т.В., Песяков А.В., Емельянов Д.В. Опыт рыхления скального грунта газогенераторами на основе хлората натрия в условиях городской застройки. *Горный журнал*. 2026;(6):19–25. <https://doi.org/10.17580/gzh.2026.06.03>
Vinogradov Yu.I., Sergienko N.N., Vasiliev T.V., Pesyakov A.V., Emelyanov D.V. Experience of hard rock softening by sodium chlorate-based gas generators in urban development. *Gornyi Zhurnal*. 2026;(6):19–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2026.06.03>
10. Якубовский М.М., Гетманова А.Р., Кузина А.В. Проблемы добычи строительных материалов и возможности их решения. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024;16(4):1706–1716. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-4-1706-1716>
Yakubovskiy M.M., Getmanova A.R., Kuzina A.V. Problems of extraction of building materials and the possibilities of their solution. *Sustainable Development of Mountain Territories*. (In Russ.) 2024;16(4):1706–1716. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-4-1706-1716>
11. Наговицын О.В., Возняк М.Г. К вопросам управления роботизированным горнодобывающим предприятием. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5-1):326–335. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_326
Nagovitsyn O.V., Voznyak M.G. Robotic mine management. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(5-1):326–335. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_326
12. Воронов А.Ю., Воронов Ю.Е., Сыркин И.С., Назаренко С.В., Юнусов И.Ф. Обзор систем безлюдных грузовых перевозок на карьерах. *Уголь*. 2022;(S12):30–36. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-S12-30-36>
Voronov A.Yu., Voronov Yu.E., Syrkin I.S., Nazarenko S.V., Yunusov I.F. A review of unmanned haulage systems at open-pit mines. *Ugol'*. 2022;(S12):30–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-S12-30-36>
13. Трубецкой К.Н., Рыльникова М.В., Владимиров Д.Я. От системы «Карьер» к новому интеллектуальному укладу открытых горных работ. *Проблемы недропользования*. 2019;(3):39–48. Режим доступа: <https://trud.igdur.ru/index.php/psu/article/view/408> (дата обращения: 19.03.2026).
Trubetskoy K.N., Rylnikova M.V., Vladimirov D.Ya. From the system “Pit” to the new intellectual structure of open cast mining. *Problems of Subsoil Use*. 2019;(3):39–48. (In Russ.) Available at: <https://trud.igdur.ru/index.php/psu/article/view/408> (accessed: 19.03.2026).



14. Юрак В.В., Душин А.В., Мочалова Л.А. Против устойчивого развития: сценарии будущего. *Записки Горного института*. 2020;242:242–247. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.242>
Yurak V.V., Dushin A.V., Mochalova L.A. Vs sustainable development: scenarios for the future. *Journal of Mining Institute*. 2020;242:242–247. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.242>
15. Трубецкой К.Н. Перспективы применения роботизированной техники на карьерах будущего. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013;(S1):354–363.
Trubetskoj K.N. Prospects of robotic technology for future careers. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2013;(S1):354–363. (In Russ.)
16. Лель Ю.И., Глебов И.А. Обоснование оптимального уклона крутонаклонных автосъездов для полноприводных автосамосвалов, эксплуатируемых при доработке алмазородных месторождений. *Горная промышленность*. 2022;(1S):95–99. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-95-99>
Lel Yu.I., Glebov I.A. Justification of optimal gradient of steeply inclined ramps for all-wheel drive dump trucks used in diamond deposit completion. *Russian Mining Industry*. 2022;(1 Suppl.):95–99. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-95-99>
17. Журавлев А.Г. Тенденции развития транспортных систем карьеров с использованием роботизированных машин. *Проблемы недропользования*. 2014;(3):164–175. Режим доступа: <https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/71> (дата обращения: 19.03.2026).
Zhuravlev A.G. Endencies of open pit transport systems progress employng robotic machines. *Problems of Subsoil Use*. 2014;(3):164–175. (In Russ.) Available at: <https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/71> (accessed: 19.03.2026).
18. Gaber T., El Jazouli Y., Eldesouky E., Ali A. Autonomous haulage systems in the mining industry: cybersecurity, communication and safety issues and challenges. *Electronics*. 2021;10(11):1357. <https://doi.org/10.3390/electronics10111357>
19. Хазин М.Л. Роботизированные карьерные самосвалы. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2020;(3):123–130. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-3-123-130>
Khazin M.L. Autonomous mining dump trucks. *News of the Ural State Mining University*. 2020;(3):123–130. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-3-123-130>
20. Yakovlev V.L., Zyryanov I.V., Zhuravlev A.G., Cherepanov V.A. Features of modern approach to selection of haulage systems for open pit diamond mines in Yakutia. *Journal of Mining Science*. 2018;54(6):979–987. <https://doi.org/10.1134/S1062739118065131>
21. Ryl'nikova M.V., Vladimirov D.Ya., Pytalev I.A., Popova T.M. Robotic geotechnologies as way of improving efficiency and ecologization of mineral resource management. *Journal of Mining Science*. 2017;53(1):84–91. <https://doi.org/10.1134/S1062739117011884>
22. Zhang K., Kang L., Chen X., He M., Zhu C., Li D. A review of intelligent unmanned mining current situation and development trend. *Energies*. 2022;15(2):513. <https://doi.org/10.3390/en15020513>
23. Лукичев С.В., Наговицын О.В., Ильин Е.А., Рудин Р.С. Цифровые технологии инженерного обеспечения горных работ – первый шаг к созданию «умного» добычного производства. *Горный журнал*. 2018;(7):86–90. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.07.17>
Lukichev S.V., Nagovitsyn O.V., Ilin E.A., Rudin R.S. Digital technologies for sustainable engineering in mining – The first step towards a “smart mine”. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(7):86–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.07.17>
24. Ефимов В.И., Абрамкин Н.И., Ефимова Н.В. Применение безлюдных технологий на открытых горных работах. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021;13(3):449–456.
Efimov V.I., Abramkin N.I., Efimova N.V. The use of unpopulated technologies in open-pit mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021;13(3):449–456. (In Russ.)
25. Vorobev A.Ye., Metaxa G.P., Bolenov Ye.M., Metaxa A.S., Alisheva Zh.N. Digitization of the mining industry. concept and modern geotechnology. *News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. 2019;4(436):121–127. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.105>
26. Sizemov D.N., Temkin I.O., Deryabin S.A., Vladimirov D.Ya. On some aspects of increasing the target productivity of unmanned mine dump trucks. *Eurasian Mining*. 2021;(2):68–73. <https://doi.org/10.17580/em.2021.02.15>
27. Логинов Е.В., Кара С.В., Масальский С.С., Петров К.Д. Обоснование параметров системы открытой разработки при использовании комплекса экскаватор–автосамосвал в условиях Крайнего Севера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(6):17–30. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_6_0_17
Loginov E. V., Kara S. V., Masalskiy S. S., Petrov K. D. Justification of parameters of open pit mining using truck-and-shovel systems in the Extreme North. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(6):17–30. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_6_0_17
28. Babyr N.V., Kuziev D.A., Sazankova E.S., Dobler M.O. Influence of cyclic impacts of powered roof support on weakening of immediate roof rocks. *Eurasian Mining*. 2026;(1):14–19. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/2523/article/41017/> (accessed: 17.04.2026).



29. Темкин И.О., Клебанов Д.А., Дерябин С.А., Конов И.С. Построение интеллектуальной геоинформационной системы горного предприятия с использованием методов прогнозной аналитики. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(3):114–125. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-3-0-114-125>
Temkin I.O., Klebanov D.A., Deryabin S.A., Konov I.S. Construction of intelligent geoinformation system for a mine using forecasting analytics techniques. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(3):114–125. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-3-0-114-125>
30. Клементьева И.Н., Кузиев Д.А. Установление максимальной жесткости упругодемпфирующего устройства в механизме тяги драглайна. *Горный журнал*. 2021;(5):79–83. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.05.09>
Klementieva I.N., Kuziev D.A. Maximal stiffness of elastically damping device in traction of draglines. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(5):79–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.05.09>
31. Voronov Yu., Voronov A., Makhambayev D. Current state and development prospects of autonomous haulage at surface mines. *E3S Web of Conferences*. 2020;174:01028. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017401028>
32. Стенин Д.В. Перспективы развития производства автономных тяжелых платформ для безлюдной добычи полезных ископаемых. *Горное оборудование и электромеханика*. 2019;(6):3–8. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2019-6-3-8>
Stenin D.V. Prospects for the development of the production of autonomous heavy platforms for un-manned mining. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2019;(6):3–8. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2019-6-3-8>
33. Сорокин О.И., Шоков А.А. Внедрение автоматизированной системы управления горнотранспортным комплексом. *Горный журнал*. 2017;(5):85–88. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.05.20>
Sorokin O.I., Shokov A.A. Introduction of automated control over mining and transportation. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(5):85–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.05.20>
34. Дубинкин Д.М., Максимова О.С. Современное состояние цифровизации и роботизации при разработке недр открытым способом. В кн.: *Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2022: сб. материалов 19-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Кемерово, 23–24 ноября 2022 г.* Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева; 2022. С. 501.1–501.8. Режим доступа: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Sibresource/2022/materials/pages/Articles/501.pdf> (дата обращения: 19.03.2026).
35. Reshetnyak S.N., Zotov V.V., Kuziev D.A., Kozlova O.Yu. Enhancing performance efficiency of electric consumers with in surface infrastructure of coal mines. *Eurasian Mining*. 2025;(1):100–104. <https://doi.org/10.17580/em.2025.01.20>

Информация об авторах

Лиготский Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений открытым способом, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-4708-1595>

Долгушин Никита Андреевич – аспирант кафедры разработки месторождений открытым способом, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0004-2025-1859>; e-mail: s235068@stud.spmi.ru

Information about the authors

Dmitry N. Ligotsky – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Open-pit Mining, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-4708-1595>

Nikita A. Dolgushin – Postgraduate Student of the Department of Open-pit Mining, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0004-2025-1859>; e-mail: s235068@stud.spmi.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 05.06.2026
Поступила после рецензирования: 29.07.2026
Принята к публикации: 04.08.2026

Article info

Received: 05.06.2026
Revised: 29.07.2026
Accepted: 04.08.2026