

УДК 622.684:629.3

**Глебов Игорь Андреевич**

научный сотрудник,  
лаборатория транспортных  
систем карьеров и геотехники,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [i.glebov@igduran.ru](mailto:i.glebov@igduran.ru);

**Лель Юрий Иванович**

доктор технических наук, профессор,  
Уральский государственный  
горный университет,  
620144, г. Екатеринбург,  
пер. Университетский, 9  
e-mail: [lel49@mail.ru](mailto:lel49@mail.ru);

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОХОДКИ ТОННЕЛЯ  
СПИРАЛЬНОЙ ФОРМЫ  
ПРИ ДОРАБОТКЕ  
ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТОВ  
АЛМАЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

*Аннотация:*

При разработке алмазородных крутопадающих месторождений актуальным является вопрос увеличения потенциала открытых горных работ за счет внедрения техники и технологий, обеспечивающих доработку до глубины более 500 м. Это обусловлено тем, что переход на добычу алмазов подземным способом влечет за собой высокие затраты на строительство выработок и уменьшение производственной мощности предприятия.

В 2017 г. авторами статьи совместно с сотрудниками института «Якутнiproalmaz» была предложена перспективная схема вскрытия глубоких горизонтов Нюрбинского карьера АК «АЛРОСА». Данная схема подразумевает перенос автомобильных съездов за контур карьера в тоннель спиральной формы, что позволяет увеличить конструктивные углы откосов бортов и приблизить их к значениям устойчивых углов.

В свою очередь, технология вскрытия законтурным тоннелем спиральной формы должна обеспечивать необходимую скорость проходки, которая определяется скоростью углубки карьера, уклоном тоннеля, вертикальным расстоянием между порталами, зависит от углов наклона рабочего и нерабочего бортов карьера. В статье рассмотрены основные параметры тоннеля, применяемое при проходке оборудование и сравнение буровзрывного и комбайнового способов проходки законтурного тоннеля спиральной формы с уклоном 18 – 20 %.

*Ключевые слова:* карьер, схема вскрытия, технология проходки, способ проходки, шарнирно-сочлененные самосвалы, тоннель, скорость проходки, проходческий комбайн, буровзрывной способ проходки.

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.01.038

**Glebov Igor A.**

Scientific Researcher,  
Laboratory of transport systems  
and geomechanics,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [i.glebov@igduran.ru](mailto:i.glebov@igduran.ru)

**Lel Yuri I.**

Doctor of technical sciences,  
Professor,  
Ural State Mining University,  
620144 Ekaterinburg,  
9 University Lane  
e-mail: [lel49@mail.ru](mailto:lel49@mail.ru)

**THE TECHNOLOGY OF TUNNELING  
A SPIRAL-SHAPED TUNNEL DURING  
THE COMPLETION OF DEEP HORIZONS  
OF A DIAMOND ORE DEPOSIT**

*Abstract:*

When developing diamond ore deposits, the issue of increasing the potential of open-pit mining through the introduction of equipment and technologies that ensure refinement to a depth of more than 500 m is relevant. This is due to the fact that the transition to underground diamond mining entails high costs for the construction of workings and a decrease in the production capacity of the enterprise.

In 2017, the authors of the article, together with employees of Yakutniproalmaz, proposed a promising scheme for opening the deep horizons of the Nyurbinsky quarry of AK ALROSA. This scheme implies the transfer of automobile exits beyond the contour of the quarry into a spiral-shaped tunnel, which makes it possible to increase the structural angles of the slopes of the sides and bring them closer to the values of stable angles.

In turn, the technology of tunneling a curved spiral tunnel should provide the necessary penetration speed, determined by the speed of deepening the quarry, the slope of the tunnel, the vertical distance between the portals, depends on the angles of inclination of the working and non-working sides of the quarry.

The article considers the main parameters of an underground mine (tunnel), examines the equipment used for sinking and presents comparing data of the drilling and blasting and the combine methods for sinking a spiral-shaped tunnel with a slope of 18 – 20 %.

*Key words:* quarry, opening scheme, penetrating technology, sinking method, articulated dump trucks, tunnel, sinking speed, tunneling combine, drilling and blasting method of sinking.

## Введение

При разработке алмазородных крутопадающих месторождений актуальным является вопрос увеличения потенциала открытых горных работ за счет внедрения техники и технологий, обеспечивающих доработку до глубины более 500 м. Это обусловлено тем, что переход на добычу алмазов подземным способом влечет за собой высокие затраты на строительство выработок и уменьшение производственной мощности предприятия.

Одним из перспективных направлений в отработке глубоких месторождений является использование крутонаклонных автомобильных съездов, которые, в свою очередь, позволяют значительно сократить затраты на вскрышные работы и увеличить глубину разработки открытым способом. Начиная с 2008 г. институт «Якутнипроалмаз» предлагает на ряде карьеров АК «АЛРОСА» строить транспортные коммуникации в глубинной зоне с продольным уклоном до 24 %. Для обеспечения работы на таких уклонах предлагается использовать шарнирно-сочлененные самосвалы с полным приводом. Опыт эксплуатации таких автосамосвалов имеется при доработке карьера «Удачный» [1, 2].

В 2017 г. авторами статьи совместно с сотрудниками института «Якутнипроалмаз» была предложена перспективная схема вскрытия глубоких горизонтов Нюрбинского карьера АК «АЛРОСА» [3]. Данная схема подразумевает перенос автомобильных съездов за контур карьера в тоннель спиральной формы при доработке карьера, что позволяет увеличить конструктивные углы откосов бортов и приблизить их к значениям устойчивых углов. Это ведет к увеличению потенциала открытого способа разработки. В свою очередь, использование шарнирно-сочлененных самосвалов при вскрытии тоннелем позволяет увеличить уклоны и сократить объемы строительства тоннеля.

Рекомендована разработка месторождения в три этапа (рис. 1):

1. На первом этапе вскрытие осуществляется спиральными или спирально-петлевыми съездами с уклоном 8 – 10 %. Используются традиционные карьерные самосвалы. В условиях Нюрбинского карьера АК «АЛРОСА» используются самосвалы Caterpillar грузоподъемностью 91 т.

2. На втором этапе осуществляется переход на крутонаклонное вскрытие с использованием шарнирно-сочлененных самосвалов. Уклон транспортных съездов увеличивается до 18 – 24 % [4 – 7]. В условиях Нюрбинского карьера предлагается использовать самосвалы грузоподъемностью 40 – 45 т. Для установления грузотранспортной связи между этапами организуется перегрузочный пункт.

3. На третьем этапе крутонаклонные съезды перемещаются в подземное пространство за контуром карьера с уменьшением уклона до 20 %. Строится тоннель спиральной формы и выработки, обеспечивающие выходы на горизонты в рабочую зону карьера.

Важным вопросом при оценке эффективности предложенной схемы вскрытия является определение параметров и технологии проходки подземных выработок (тоннеля и квершлагов).

Определяющими параметрами при выборе сечения тоннеля являются ширина проезжей части и высота оборудования, используемого при транспортировании горной массы. На рис. 2 показаны сечения для однопутного и двухпутного вариантов тоннеля с применением шарнирно-сочлененных самосвалов CAT-745C. В настоящее время использование данных самосвалов может быть затруднено, однако на рынке существуют аналоги китайского производства, а также проходят испытания отечественных самосвалов.

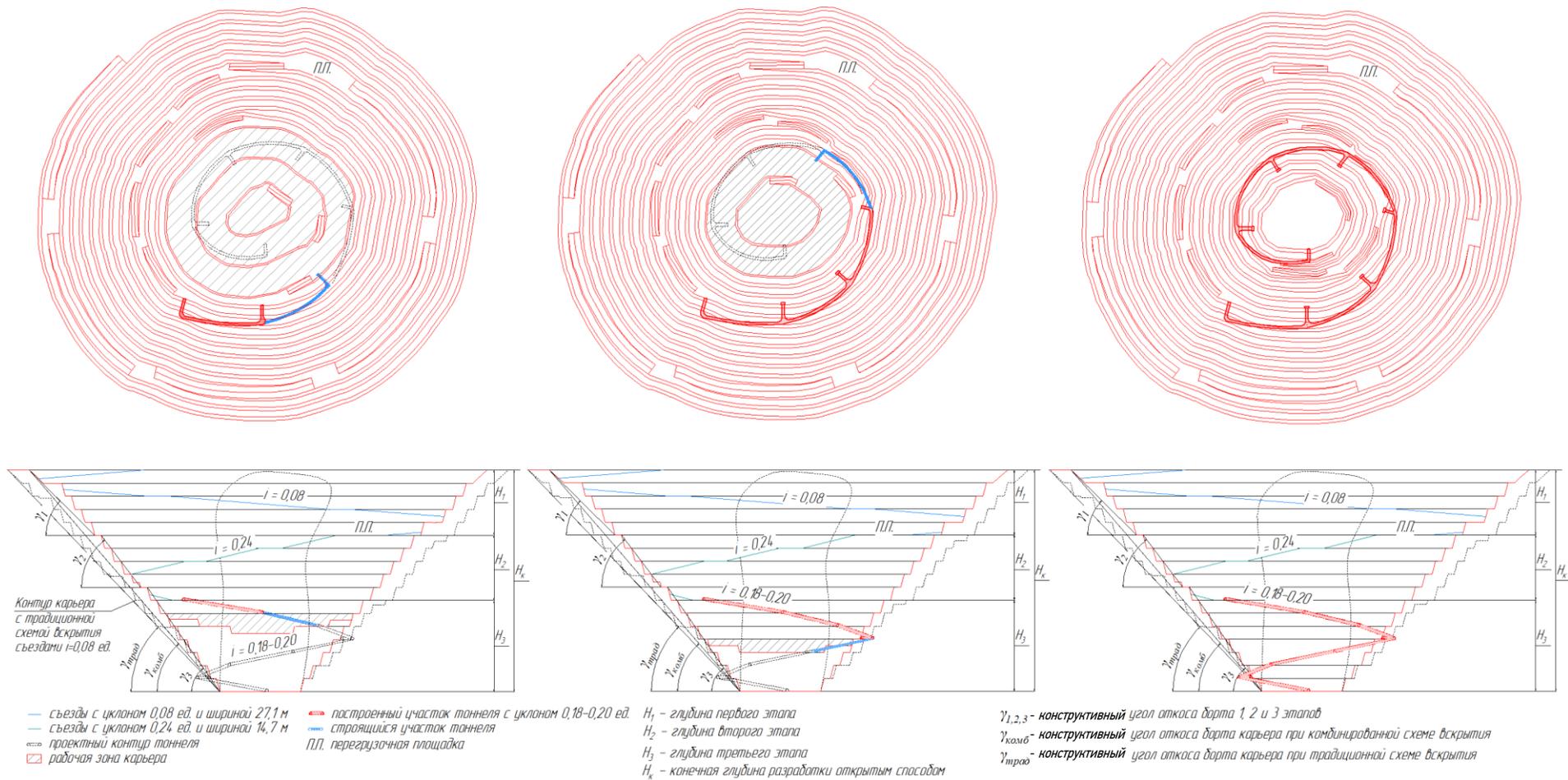


Рис.1. Схема вскрытия глубоких горизонтов карьера тоннелем спиральной формы (этапность формирования тоннеля)

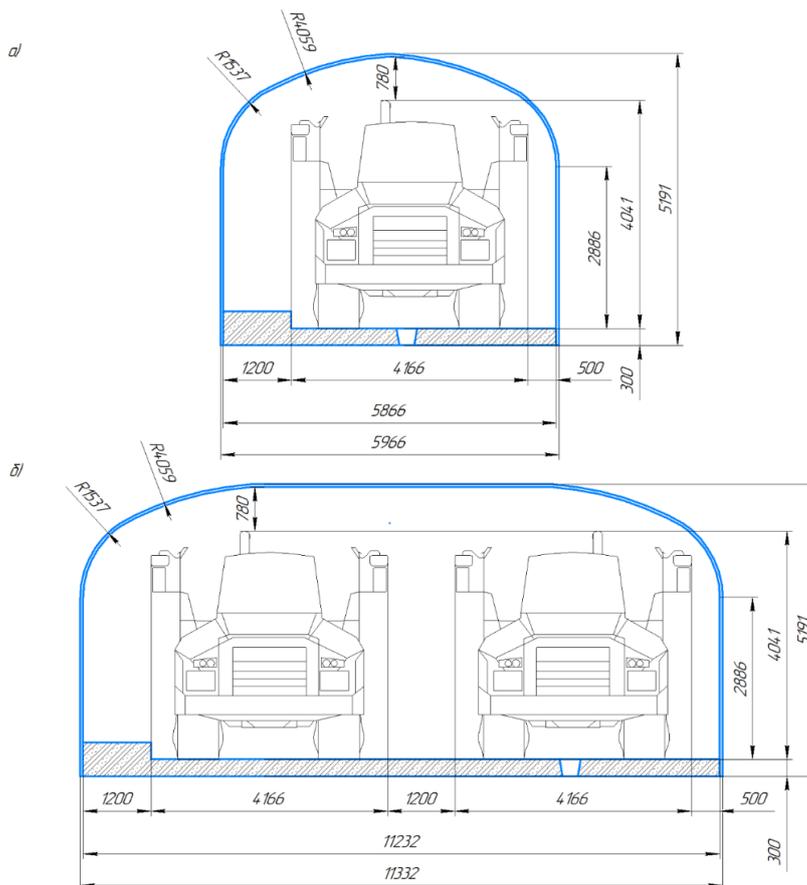


Рис. 2. Поперечное сечение тоннеля:  
 а – тоннель с однопутной автодорогой; б – тоннель с двухпутной автодорогой

Для вскрытия глубоких горизонтов Нюрбинского карьера был принят вариант с однопутным тоннелем. Это связано в первую очередь с высокими затратами на строительство двухпутного варианта тоннеля и с достаточной провозной и пропускной способностью первого варианта [8]. Расчетные параметры выработок показаны в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры поперечного сечения тоннеля при использовании ШСС CAT-745С**

Параметры	Значения	
	Однопутный тоннель	Двухпутный тоннель
Параметры самосвала:		
высота $h_a$ , м		4,17
ширина $B_a$ , м		4,04
Толщина дорожного покрытия $h_{п}$ , м		0,30
Ширина выработки в свету $B_{св}$ , м	5,87	11,2
Высота выработки в черне $H_{вч}$ , м		5,19
Высота выработки в свету $H_{св}$ , м		4,84
Толщина слоя крепи $h_k$ , м		0,05
Площадь поперечного сечения тоннеля в свету $S_{тс}$ , м <sup>2</sup>	25,90	65,20
Проектная площадь сечения выработки с учетом крепи в черне $S_{тч}$ , м <sup>2</sup>	28,30	66,10
Площадь сечения выработки в проходке $S_{тп}$ , м <sup>2</sup>	29,70	69,40

Технология строительства законтурного тоннеля спиральной формы должна обеспечивать необходимую скорость проходки, которая в свою очередь определяется скоростью углубки карьера, уклоном тоннеля, вертикальным расстоянием между порталами, зависит от углов наклона рабочего и нерабочего бортов карьера и составляет 209 – 216 м/год или 17,4 – 18,0 м/мес [8].

Для обоснования технологии проходки были рассмотрены два способа, применяющиеся на подземных рудниках АК «АЛРОСА»: буровзрывной и комбайновый [9, 10].

Расчет параметров обоих способов проходки произведен с учетом физико-механических свойств горных пород, горнотехнических условий и используемого на подземных рудниках АК «АЛРОСА» оборудования [11, 12]. Так, например, для бурения шпуров предлагается использовать буровую установку Boomer M2D, а для проходки тоннеля комбайновым способом – комбайн AM-105 фирмы Voest Alpina Mainer. Для транспортирования горной массы из забоя рационально использовать технологический автотранспорт (шарнирно-сочлененные самосвалы) и погрузочную машину непрерывного действия ПНБ-3Д.

Расчетные параметры буровзрывного способа показаны в табл. 2 и на рис. 3.

Таблица 2

**Параметры буровзрывных работ при проходке тоннеля**

Параметры	Значения	
Система взрывания	Неэлектрическая (СИНВ-III)	
Тип ВВ	Аммонит № 6ЖВ	
Число шпуров, шт.	40	
Глубина шпура, м	3,0-3,4	
Средняя величина заряда на один шпур, кг	2,15	
	в т.ч. на врубовый	2,58
	на вспомогательный	2,15
	на оконтуривающий	1,72
Расход ВВ за цикл проходки, кг	78,7	
Расход ВВ на погонный метр выработки, кг	29,2	
Объем горной массы за один взрыв, м <sup>3</sup>	80,2	
Удельный расход ВВ, кг/ м <sup>3</sup>	0,98	
Расход средств взрывания (УВТ, КД, соединительные блоки), шт./м	15,0	
Удельный расход средств взрывания, шт./м <sup>3</sup>	0,5	
Тип вруба	клиновой	
Коэффициент использования шпура	0,85	

При проходке тоннеля комбайновым способом организация работ должна обеспечивать максимальное использование рабочего времени комбайна, совмещение во времени основных процессов проходческого цикла, которые не имеют ярко выраженных границ, как при буровзрывном способе. Скорость проходки тоннелей с применением комбайнов ограничивается в основном сложностью крепления. Для крепления тоннелей предлагается использовать анкеры в сочетании с армирующими сетками и набрызгбетоном.

Комбайновый способ проходки сопровождается повышенной запыленностью воздуха в призабойном пространстве и возможностью газовыделения из породных обнажений, а буровзрывной способ сопровождается выделением ядовитых газов при взрыве ВВ. Поэтому проветривание горных выработок при проходке и эксплуатации тоннеля имеет большое значение. Расчетные параметры проветривания тоннеля показаны в табл. 3.

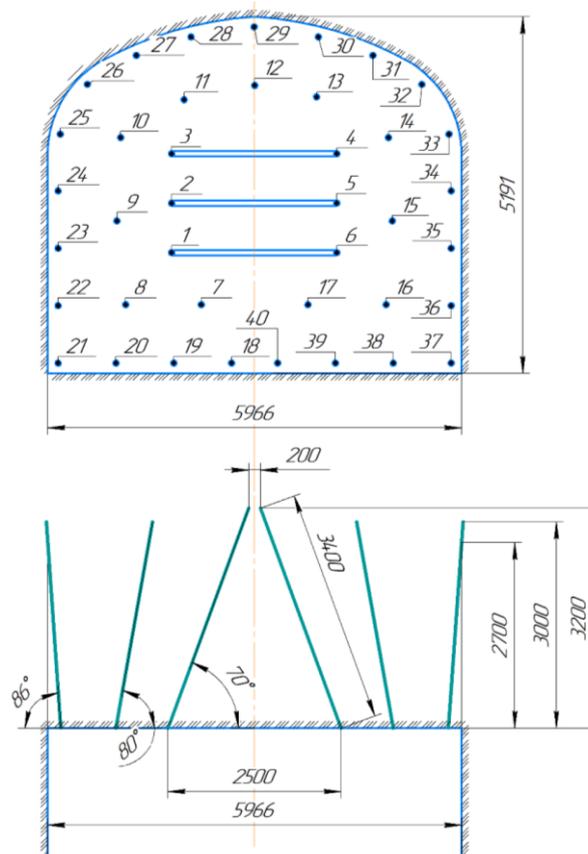


Рис. 3. Схема расположения шпуров при проходке тоннеля

Таблица 3

**Расчетные параметры проветривания тоннеля  
при различных способах проходки**

Параметры	Значения		
	Буровзрывной	Комбайновый	
Способ проходки	Буровзрывной	Комбайновый	
Сечение тоннеля в свету, м <sup>2</sup>	25,9	25,9	
Кол-во подаваемого воздуха для проветривания забоя после взрыва и по пылевому фактору, м <sup>3</sup> /с	5,8	12,0	
Депрессия, необходимая для доставки воздуха в забой, Па	116,7	495,0	
Сопротивление трубопровода, Нс <sup>2</sup> /м <sup>8</sup>	2,45	2,45	
Модель вентилятора	ВМ-8М	ВМ-12М	
Производительность (подача), м <sup>3</sup> /мин	600	1200	
Статический напор, Па	3200	3000	
КПД вентилятора	0,8	0,82	
Мощность двигателя, кВт	52	110	
Основные размеры, мм:	– длина	1460	1900
	– ширина	880	1350
	– высота	1100	1500
Масса, кг	650	2000	

В результате технико-экономического сравнения вариантов проходки было установлено, что оба варианта приемлемы для проходки законтурного тоннеля спиральной формы при доработке глубоких горизонтов карьера.

Опыт проходки подземных спиральных съездов на рудниках «Мир» и «Интернациональный» показал, что средняя скорость проходки комбайновым способом составляла 120 – 150 м/мес, а буровзрывным способом – 70 – 80 м/мес. Однако при проходке тоннельного съезда необходимо учитывать время на крепление, обустройство тоннеля и проходку ниш для обмена автосамосвалов. Тогда скорость проходки будет составлять 45 – 55 м/мес при буровзрывном способе и 80 – 90 м/мес – при комбайновом. Данные значения в три и более раз превышают необходимую скорость проходки тоннеля.

Средняя стоимость проходки буровзрывным способом составляет 25,0 тыс. руб./м<sup>3</sup>, а комбайновым – 41,5 тыс. руб./м<sup>3</sup>. Это объясняется в основном высокой стоимостью проходческого оборудования при использовании комбайнов избирательного действия и их эксплуатации. На рудниках АК «АЛРОСА» комбайны используются при отработке полезного ископаемого с целью обеспечения сохранности алмазов.

Поскольку в нашем случае проходка тоннеля производится по вмещающим породам, был принят более дешевый буровзрывной способ проходки тоннеля (табл. 4).

Таблица 4

**Технико-экономические показатели проходки однопутного тоннеля**

Способ проходки	Скорость проходки, м/мес	Стоимость проходки, тыс. руб./м <sup>3</sup>
Буровзрывной	45 – 55	25,0
Комбайновый	80 – 90	41,5

### Список литературы

1. Зырянов И.В., Цымбалова А.И., 2013. Испытания САТ-740В на крутонаклонных съездах карьера «Удачный» АК «АЛРОСА». *Горное оборудование и электромеханика*, № 9, С. 22 – 25.
2. Глебов А.В., Лель Ю.И., Глебов И.А., 2014. Перспективный сборочный транспорт открытых горных работ. *Горное оборудование и электромеханика*, № 5(102), С. 18 – 22.
3. Акишев А.Н., Лель Ю.И., Ильбульдин Д.Х., Мусихина О.В., 2017. Глебов И.А. Технологические решения по вскрытию и отработке глубоких горизонтов Нюрбинского карьера АК «АЛРОСА». *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 7, С. 4 – 12.
4. Лель Ю.И., Глебов И.А., 2022. Обоснование оптимального уклона крутонаклонных автосъездов для полноприводных автосамосвалов, эксплуатируемых при доработке алмазородных месторождений. *Горная промышленность*, № S1, С. 95 – 99.
5. Akdag S., Basarir H., Karpuz C., Ozyurt V., 2015. Stability analysis and optimized slope angle for the iron ore open-pit mine. *Proceedings of the 24th International Mining Congress and Exhibition of Turkey*. Antalya, Turkey, P. 606 – 611.
6. Haiyong T., Yanhua S., Wenming Z., Chun J., 2011. Slip ratio control for articulated dump truck based on fuzzy sliding mode. *Proceedings of the International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, CECNet 2011*, P. 4404 – 4407.
7. Brown D., Heather R., 1979. Development of off-highway articulated dump trucks. *SAE Technical Paper, D. J. B. Engineering Ltd.*, 12 p.

8. Лель Ю.И., Глебов И.А., Исаков С.В. и др., 2023. Технология перехода на тоннельное вскрытие при доработке глубоких кимберлитовых карьеров. Известия высших учебных заведений. Горный журнал, № 6, С. 38 – 49.

9. Проблемы и пути эффективной отработки алмазоносных месторождений. *Международная научно-практическая конференция: сборник*. Новосибирск: Наука, 2011, 584 с.

10. Колганов В.Ф., Акишев А.Н., Дроздов А.В., 2013. *Горно-геологические особенности коренных месторождений Якутии*; АК «АЛРОСА», Ин-т «Якутнипроалмаз». Мирный: Мирнинская городская типография, 568 с.

11. Носенко А.С., Домницкий А.А., Шемшуря Е.А., 2016. Строительство транспортных тоннелей с применением комбайновой технологии. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Сер.: Технические науки*, № 3, С. 63 – 70.

12. Макаров В.В., Хрулев Е.А., Миробян А.А., 2016. Эффективность и комплексная оценка строительства тоннельных автодорожных систем. *Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета*, №1 (26), С. 134 – 142.

### References

1. Zyryanov I.V., Tsymbalova A.I., 2013. Ispytaniya CAT-740B na krutonaklonnykh s"ezdakh kar'era [Tests of the CAT-740B on steep-slope ramps of the Udachny quarry of ALROSA.] "Udachnyi" АК "ALROSA". *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, № 9, P. 22 – 25.

2. Glebov A.V., Lel' Yu.I., Glebov I.A., 2014. Perspektivnyi sborochnyi transport otkrytykh gornyykh rabot [Promising industrial transport of open-pit mining operations]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, № 5(102), P. 18 – 22.

3. Akishev A.N., Lel' Yu.I., Il'bul'din D.Kh., Musikhina O.V., 2017. Glebov I.A. Tekhnologicheskie resheniya po vskrytiyu i otrabotke glubokikh gorizontov Nyurbinskogo kar'era АК "ALROSA" [Technological solutions for opening and working out the deep horizons of the Nyurbinsky quarry of АК ALROSA]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, № 7, P. 4 – 12.

4. Lel' Yu.I., Glebov I.A., 2022. Obosnovanie optimal'nogo uklona krutonaklonnykh avtos"ezdov dlya polnoprivodnykh avtosamosvalov, ekspluatiruemykh pri dorabotke almazorudnykh mestorozhdenii [Substantiation of the optimal slope of steeply inclined car crossings for four-wheel drive dump trucks operated during the completion of diamond ore deposits]. *Gornaya promyshlennost'*, № S1, P. 95 – 99.

5. Akdag S., Basarir H., Karpuz C., Ozyurt V., 2015. Stability analysis and optimized slope angle for the iron ore open-pit mine. *Proceedings of the 24th International Mining Congress and Exhibition of Turkey*. Antalya, Turkey, P. 606 – 611.

6. Haiyong T., Yanhua S., Wenming Z., Chun J., 2011. Slip ratio control for articulated dump truck based on fuzzy sliding mode. *Proceedings of the International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, CECNet 2011*, P. 4404 – 4407.

7. Brown D., Heather R., 1979. Development of off-highway articulated dump trucks. *SAE Technical Paper, D. J. B. Engineering Ltd.*, 12 p.

8. Lel' Yu.I., Glebov I.A., Isakov S.V. i dr., 2023. Tekhnologiya perekhoda na tonnel'noe vskrytie pri dorabotke glubokikh kимберлитovykh kar'erov [Technology of transition to tunnel opening during the completion of deep kimberlite quarries]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, № 6, P. 38 – 49.

9. Problemy i puti effektivnoi otrabotki almazonosnykh mestorozhdenii. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya: sbornik [Problems and ways of effective mining of diamond-bearing deposits]. Novosibirsk: Nauka, 2011, 584 p.

10. Kolganov V.F., Akishev A.N., Drozdov A.V., 2013. Gorno-geologicheskie osobnosti korennykh mestorozhdenii Yakutii [Mining and geological features of the indigenous deposits of Yakutia]; АК "ALROSA", In-t "Yakutniproalmaz". Mirnyi: Mirninskaya gorodskaya tipografiya, 568 p.

11. Nosenko A.S., Domnitskii A.A., Shemshura E.A., 2016. Stroitel'stvo transportnykh tonnelei s primeneniem kombainovoi tekhnologii [Construction of transport tunnels using combine technology]. Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Ser.: Tekhnicheskie nauki, № 3, P. 63 – 70.

12. Makarov V.V., Khrulev E.A., Mirobyan A.A., 2016. Effektivnost' i kompleksnaya otsenka stroitel'stva tunnel'nykh avtodorozhnykh sistem [Efficiency and comprehensive assessment of the construction of tunnel road systems]. Vestnik inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta, №1 (26), P. 134 – 142.