

# СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРИРОДОЕМКОСТИ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ И ДИЗЕЛЬ-ТРОЛЛЕЙВОЗОВ

**Аннотация.** Приведена сравнительная оценка природоемкости карьерных автосамосвалов и дизель-троллейбусов. Автомобильный транспорт, являющийся основным видом транспорта глубоких карьеров в настоящее время, является, также и основным загрязнителем окружающей среды. В мире работает более 120 дизель-троллейбусов, машин, работающих на дизельном топливе и на электроэнергии. Приведены данные о величинах вредных выбросов в атмосферу как автосамосвалов, так и дизель-троллейбусов. Показано, что сумма отношений концентраций вредных выбросов к их предельно допустимым значениям, как для автосамосвалов, так и дизель-троллейбусов возрастает при увеличении глубины карьера, при работе дизель-троллейбусов общий объем вредных выбросов более чем в два раза меньше. Приведена энергетическая эффективность автосамосвалов и дизель-троллейбусов. Показано, что применение дизель-троллейбусов дает незначительное увеличение коэффициента полезного использования энергии. При экономическом сравнении экономия может быть только в эксплуатационных затратах на дизельном топливе.

**Ключевые слова:** карьерные самосвалы, дизель-троллейбусы, экологическая и экономическая эффективность машин, глубина карьера, энергетическая эффективность транспортных машин, коэффициент полезного использования энергии.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-119-125

За последние десятилетия значительно усложнились условия эксплуатации технологического автомобильного транспорта из-за увеличения глубины карьеров и концентрации производства, что обуславливает поиск путей уменьшения как затрат на транспортирование горной массы, так и природоемкости.

Основным видом технологического транспорта в глубоких карьерах в настоящее время остается автомобильный, который используется для транспортирования примерно 80% всей горной массы в мире. При этом доля затрат на автотранспорт часто превышает 60% в себестоимости добычи полезного ископаемого, а доля вредных выбросов в атмосферу, приходящаяся на транспорт, превышает 50% [1].

Вместе с тем, мобильность, маневренность, независимость от источников энергии, автономность работы автосамосвалов обуславливают нежелание предприятий менять транспортную систему, даже когда автотранспорт работает не в зоне своего эффективного применения. Увеличение грузоподъемности автосамосвалов, создание автосамосвалов на гусеничном ходу не смогут существенно изменить ситуацию [2].

Наиболее перспективным вариантом замены автосамосвала в этих условиях представляется применение дизель-троллейбусов. В мире работают более 120 дизель-троллейбусов: автосамосвалов, оснащенных двумя системами привода — от электродвигателя и от двигателя внутреннего сгорания. Проявляют

интерес к дизель-троллейвозам и карьеры [3]. Известно, что при эксплуатации дизель-троллейвозов увеличивается скорость движения по уклону (при  $\approx 70\text{--}80\%$  с  $10\text{--}12$  км/ч у автосамосвалов до  $22\text{--}24$  км/ч у дизель-троллейвозов), производительность машин (на  $23\text{--}25\%$ ) и коэффициент технической готовности, снижается расход дизельного топлива на  $15\text{--}30\%$  (в зависимости от степени электрификации трассы) и количество машин для вывоза требуемого грузопотока [4, 5, 6].

Сравним несколько подробнее ущерб, наносимый воздушной среде и расход природных ресурсов при применении автомобильного и дизель-троллейвозного транспорта.

Для примера был взят автосамосвал БелАЗ-7513, который в настоящее время работает на Сорском карьере и дизель-троллейвоз на базе автосамосвала БелАЗ-7513 при степени электрификации трассы  $85\%$ .

Средние расчетные величины концентрации вредных веществ ( $\sum_{i=1}^n C_i / \text{ПДК}_i$ )

в атмосфере карьера различной глубины при эксплуатации автомобильного и дизель-троллейвозного транспорта показаны на рис. 1.

Из приведенных данных следует, что применение дизель-троллейвозов положительно скажется на воздушной среде рабочей зоны карьера: количество вредных выбросов уменьшается более чем в 2 раза. При этом количество машин уменьшится на  $10\text{--}15\%$  [7].

Затраты природного капитала можно оценить расходом энергии. Можно выделить несколько вариантов расчета при оценке расхода энергии различными видами транспортных средств карьеров. Один из них заключается в переводе расхода дизтоплива автосамосвалами из натуральных единиц (г, кг) в кДж или кВт · ч путем умножения на удельную теплоту сгорания дизтоплива  $Q_{\text{д.т}}$  [8]. При этом несколько занижаются показатели автомобильного транспорта, так как сравнивается дизтопливо (источник энергии приближенный к сырой нефти) и электроэнергия, вырабатываемая на тепловых и гидроэлектростанциях.

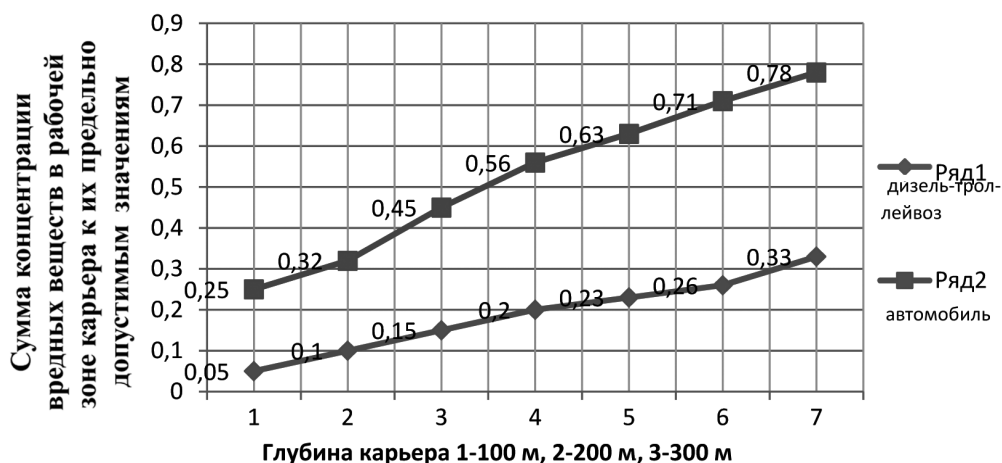


Рис. 1. Концентрация вредных веществ в атмосфере карьеров различной глубины при эксплуатации автомобильного и дизель-троллейвозного транспорта

Fig. 1. Concentration of hazardous substances in air in open pit mines of different depth during operation of dump trucks and diesel trolley cars

При другом подходе расход электроэнергии приводится к расходу дизтоплива путем умножения на коэффициент, характеризующий удельный расход дизтоплива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии на дизельных электростанциях. При этом завышается энергоемкость электрифицированных видов транспорта, так как основной объем электроэнергии горнодобывающие предприятия получают с электростанций, работающих на природном газе, угле и мазуте.

Более объективным можно считать приведение расхода электроэнергии и дизельного топлива к расходу первичных энергоресурсов, т.е. к «условному топливу» (у.т.), с учетом соответствующих затрат энергии на их добычу, переработку и транспортирование. В отечественной практике в качестве «условного топлива» используется так называемый угольный эквивалент — 7000 ккал (29,3 МДж) — теплота, которая выделяется при сжигании 1 т высококачественного угля.

В качестве критерия для условий глубоких карьеров рационально принять величину удельных затрат энергии на подъем 1 т горной массы из карьера.

Приведение фактических затрат энергии к расходу первичных энергоресурсов (у.т.) осуществляется с использованием следующих выражений

$$P_{\text{ф.а.}} = g'k_{\text{пер}} k_{\text{т}} k_{\text{д}} P_{\text{ф.э.}} = \omega'k_{\text{э}} k_{\text{пот}} k_{\text{д}}$$

где  $P_{\text{ф.а.}}$ ,  $P_{\text{ф.э.}}$  — удельные затраты условного топлива на подъем 1 т горной массы на 1 м, соответственно, при работе от дизельного топлива и от контактной сети, г у. т./т·м;  $g'$  — удельный расход дизтоплива, г/т·м;  $\omega'$  — удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т·м;  $k_{\text{пер}}$  — коэффициент, учитывающий затраты энергии на получение дизтоплива из нефти, ( $k_{\text{пер}} = 1,18 \div 1,20$ );  $k_{\text{д}}$  — коэффициент, учитывающий затраты энергии на добычу и транспортирование топлива, ( $k_{\text{д}} = 1,04 \div 1,10$ );  $k_{\text{т}}$  — коэффициент, учиты-

вающий разницу удельной теплоты сгорания дизельного и условного топлива, ( $k_{\text{т}} = 1,5$ );  $k_{\text{э}}$  — коэффициент, учитывающий затраты условного топлива на получение 1 кВт·ч электроэнергии ( $k_{\text{э}} = 310 \div 330$  г/кВт·ч);  $k_{\text{пот}}$  — коэффициент, учитывающий потери электроэнергии при передаче и распределении ( $k_{\text{пот}} \approx 1,09$ ) [9].

Тогда коэффициент полезного использования энергии можно получить в виде

$$\eta = (P_{\text{т}}/P_{\text{ф}} Q_{\text{у.т.}}) \times 100\%$$

где  $P_{\text{т}}$  — теоретически необходимые затраты энергии  $P_{\text{т}} = 9,81$  кДж/т·м;  $P_{\text{ф}}$  — фактические затраты энергии данным видом транспорта, г у. т./т·м;  $Q_{\text{у.т.}}$  — удельная теплота сгорания условного топлива, кДж/г ( $Q_{\text{у.т.}} = 29,3$  кДж/г).

Для расчета были приняты условия Сорского карьера по добыче медно-молибденовых руд, глубина которого составляет около 400 м.

Узким местом в технологическом процессе горного производства Сорского карьера является технологический транспорт. Неудовлетворительная работа транспорта во многом объясняется тем, что глубина карьера и дальность транспортирования горной массы превысили границы эффективной работы большегрузных автосамосвалов. Особенно тяжелые условия сложились для транспортирования руды: длина транспортирования составляет  $\approx 9,3$  км.

Так, при расчете по первому варианту коэффициент использования энергии, принимая удельный расход топлива при работе автомобильного транспорте,  $q_{\text{т}} = 150$  г/ткм; теплоту сгорания 1 кг дизельного топлива,  $Q_{\text{д.т.}} = 44,8$  кДж/г; величину подъема в грузовом направлении,  $H_{\text{н}} = 35-40$  м на 1 км длины, то средние удельные затраты энергии при автотранспорте определяются:

$$e_{\text{а.т.}} = q_{\text{т}} Q_{\text{д.т.}} / H_{\text{н}} \approx 0,192-0,168 \text{ МДж/тм}$$

Показатель полезного использования энергии дизельного топлива при этом составит:

$$\eta_{a.t} = e_t / e_{a.t} \times 100 = 5,16 - 5,83\% \quad (\text{в среднем } 5,5\%)$$

Учитывая, что при движении в таких условиях дизель-троллейвоза дизель обеспечивает движение только 10–40% времени рейса (в зависимости от степени электрификации трассы), а остальное время работает на холостых оборотах для поддержания систем передачи. Принимая в среднем, что дизель обеспечивает движение дизель-троллейвоза  $\approx 25\%$  времени рейса и удельные затраты электрической энергии автосамосвалом  $e_3$  равными  $1,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т} \cdot \text{км}$  и добавляя 15–20% расхода дизельного топлива на холостой ход, имеем

$$e_{a.t} - (3,600 e_3 / H_p) \times 0,75 + (q_t Q_{a.t} / H_p) \times 0,25 \times 1,15 = 0,135 - 0,155 \text{ МДж/тм}$$

$$\eta_{a.t} = e_t / e_{a.t} \times 100 = 6,3 - 7,2\% \quad (\text{в среднем } 6,75\%)$$

Эти расчеты показывают, что показатель использования энергии при исполь-

зовании дизель-троллейвоза в среднем более чем на 20% выше, чем у автосамосвалов.

Для получения более точных данных, не занижая показателей ни одного вида транспорта, был проведен поэлементный расчет затрачиваемой энергии для трассы Сорского ГОКа для определения коэффициента использования энергии.

Расход электроэнергии и дизельного топлива приводился к расходу первичных энергоресурсов, т.е. к «условному топливу» (у.т.), с учетом соответствующих затрат энергии на их добычу, переработку и транспортирование. Расчет был проведен для автосамосвалов БелАЗ-7517, БелАЗ-7513 и БелАЗ-7558, а также дизель-троллейвозов на их базе. Результаты расчета приведены на рис. 2. Коэффициент использования энергии для автосамосвалов получены равным: 6,10 для автосамосвалов БелАЗ-7558 (грузоподъемностью 90 т), 6,15 для автосамосвалов БелАЗ-7513 (грузоподъемностью 130 т) и 6,2 для БелАЗ-7518 (грузоподъемностью 160 т).

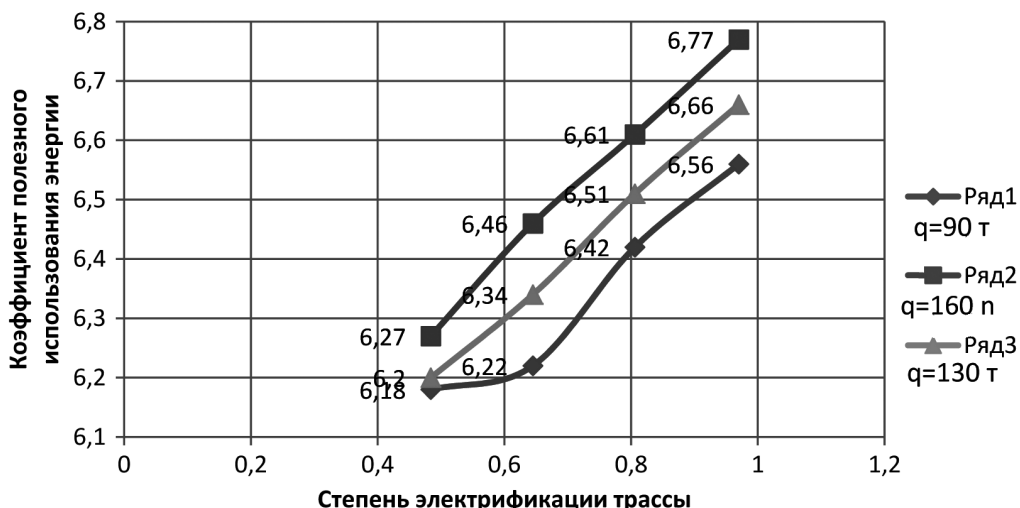


Рис. 2. Коэффициент полезного использования энергии при работе дизель-троллейвозов в зависимости от степени электрификации трассы карьера

Fig. 2. Energy efficiency of diesel trolley cars depending on the degree of electrification of routes in open pit mine

**Показатели энергетической эффективности дизель-троллейвозного транспорта на карьерах черной металлургии**  
**Energy efficiency of diesel trolley cars in open pit mines in the iron and steel industry**

Карьер	Степень электрификации трассы	Удельный расход		Показатели энергетической эффективности	
		$g_{\text{дт}}$ , г/т·км	$\omega_{\text{дт}}$ , кВт/т·км	$P\phi_{\text{дт}}$ , г у.т./т·м	$\eta$ , %
Костомукшский	52	51,8	0,28	5,29	6,3
Ингулецкий	76	29,5	0,29	4,43	7,6
«Малый Куйбас» (ММК)	64	44,5	0,32	5,39	6,2
№ 21 Донского ГОКа	75	42,0	0,39	4,90	6,8
Карагайский ОАО «Магнезит»	68	40,1	0,40	5,07	6,6

Из приведенных данных видно, что при поэлементном расчете результаты несколько отличаются от приведенных выше.

При очень высокой степени электрификации трассы (почти нереальной) коэффициент использования энергии дизель-троллейвозов больше чем у автосамосвалов на 6,5–7,5%, а при степени электрификации трассы 80% (высокая степень электрификации трассы) — уже на 5,2–6,6%.

При степени электрификации трассы ≈60% эта величина уже составляет 2–3%.

Предпроектные проработки величины коэффициента полезного использования энергии при работе дизель-троллейвозов для ряда карьеров показаны в таблице [10].

Как видно из таблицы, результаты поэлементного расчета во многом совпадают с данными таблицы.

Таким образом, сильного увеличения показателя использования энергии при применении дизель-троллейвозов ожидать не приходится.

При сравнении экономических показателей при автомобильном и дизель-троллейвозном транспорте необходимо учитывать, что хотя затраты на дизель-троллейвоз не более, чем на 5–10% больше, чем аналогичного автосамосва-

ла, затраты на создание инфраструктуры карьера (подстанции, троллейные линии) достаточно велики: в пересчете на 1 км трассы составляют более 850 тыс. евро [11, 12, 13]. Таким образом, экономия на машинах не покрывает затрат на создание инфраструктуры. Что касается эксплуатационных затрат, то здесь можно ожидать экономию по затратам на топливо.

Таким образом, можно сделать вывод, что применение дизель-троллейвозов вместо автосамосвалов на карьерах приводит к существенному улучшению только состояния воздушной среды карьера, так как общий объем вредных выбросов уменьшается более чем в два раза.

Расход первичных ресурсов энергии уменьшается незначительно: при степени электрификации трассы ≈60–65% (наиболее вероятный вариант) примерно на 2–3%.

Капитальные затраты на дизель-троллейвозы, хотя и меньше, чем на автосамосвалы в аналогичных условиях, но создание инфраструктуры для дизель-троллейвозов, как правило, превосходит эту экономию. Некоторую выгоду можно иметь только на эксплуатационные затраты на дизельное топливо при современном соотношении цен.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гридин В. Г., Калинин А. Р., Кобяков А. А. и др. Экономика, организация, управление природными и техногенными ресурсами: Учебное пособие / Под ред. А.А. Кобякова, В.А. Харченко. — М.: Изд-во «Горная книга», 2012. — 752 с.
2. Шешко О. Е. Перспективы снижения негативного воздействия карьерного автомобильного транспорта на окружающую среду // Научный вестник МГГУ. — 2012. — № 4 (25). — С. 96–101.
3. Harter M., Schipper T., Zwirello L., Ziroff A., Zwick T. Detection of overhead contact lines with a 2D-digital-beamforming radar system for automatic guidance of trolley trucks (Article). — International Journal of Vehicular Technology. — Vol. 2013, Article number 914351.
4. Key J. Mining Technology in Palabora — Mine Australia Magazine, 2003, no 3.
5. Obaid R.R., Ahmad R.H. Conference Record — IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society). — 2009, Article number 5324888.
6. Trolley renaissance (Article) Mining Magazine. — Vol. 199, Issue 2, August 2008, Pp. 16–20+22–25.
7. Gao Z., Finney C., Daw C., LaClair T.J., Smith D. Comparative Study of Hybrid Powertrains on Fuel Saving, Emissions, and Component Energy Loss in HD Trucks (Article). — Vol. 7, Issue 2, 1 October 2014.
8. Методика расчетов вредных выбросов (сбросов) для комплекса оборудования открытых горных работ (на основе удельных показателей). Национальный научный центр горного производства, Институт горного дела им. А.А. Скочинского. — Люберцы. 1999. — 68 с.
9. Тангаев И. А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. — М.: Недра, 1986. — 231 с.
10. Ворошилов Г. А., Лель Ю. И. Энергоемкость транспортных систем карьеров: оценка и перспективы // Горная техника. — 2009. — № 1. — С. 42–49.
11. Лель Ю. И., Мусихина О. В. Энергетика карьерного транспорта // Инновационный транспорт. — 2011. — № 1. — С. 34–39.
12. Степук О. Г., Зуенок А. С. Дизель — троллейвозный транспорт БЕЛАЗ: Перспективы и исполнения в горном производстве // Горный журнал. — 2013. — № 1. — С. 52–55.
13. Галкин В. И., Шешко Е. Е. Перспективы развития транспортных систем в глубоких карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — Св 1. — С. 369–379. **ПЛАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Шешко Ольга Евгеньевна — кандидат экономических наук, доцент, Институт экономики и управления промышленными предприятиями, НИТУ «МИСиС», e-mail: osheshko@mail.ru.

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 6, pp. 119–125.

## Comparative assessment of environmental impact of dump trucks and diesel trolley cars in open pit mining

Sheshko O.E., Candidate of Economical Sciences, Assistant Professor, e-mail: osheshko@mail.ru, Institute of Economics and Management of Industrial Enterprises, National University «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

**Abstract.** The article presents a comparative assessment of the environmental impact of dump trucks and diesel trolley cars operated in open pit mining. Motor transport is currently the main mode of transportation in deep open pit mines and the major pollutant of the environment. More than 120 diesel trolley cars, driven by diesel fuel and electricity, operate presently in the world. The data on hazardous emission of dump trucks and diesel trolley cars are reported. It is shown that sum of ratios of hazardous emission to their maximum allowable concentrations increases both for dump trucks and diesel trolley cars as mining

is advanced to deeper levels though in case of diesel trolley cars, the total volume of hazardous emission is more than twice as little as in operation of dump trucks. According to the data on energy efficiency, diesel trolley cars also have a little better index. Economically, saving is only achievable in terms of operating cost of diesel fuel.

**Key words:** dump trucks, diesel trolley cars, ecological and economic efficiency, open pit mine depth, energy efficiency, transport machinery.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-119-125

## REFERENCES

1. Gridin V. G., Kalinin A. R., Kobayakov A. A. *Ekonomika, organizatsiya, upravlenie prirodnymi i tekhnogenymi resursami*: Uchebnoe posobie. Pod red. A.A. Kobayakova, V.A. Kharchenko [Economics, organization, and management of natural and technogenic resources: Educational aid. Kobayakov A.A., Kharchenko V.A. (Eds.)], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2012, 752 p.
2. Sheshko O. E. Perspektivy snizheniya negativnogo vozdeystviya kar'ernogo avtomobil'nogo transporta na okruzhayushchuyu sredyu [Prospects of reducing of the negative impact of the open pit automobile transport at the environment]. *Nauchnyy vestnik MGGU*. 2012, no 4 (25), pp. 96–101. [In Russ].
3. Harter M., Schipper T., Zwirello L., Ziroff A., Zwick T. Detection of overhead contact lines with a 2D-digital-beamforming radar system for automatic guidance of trolley trucks (Article). *International Journal of Vehicular Technology*. Vol. 2013, Article number 914351.
4. Key J. Mining Technology in Palabora. *Mine Australia Magazine*, 2003, no 3.
5. Obaid R. R., Ahmad R. H. *Conference Record IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*. 2009, Article number 5324888.
6. Trolley renaissance (Article) *Mining Magazine*. Vol. 199, Issue 2, August 2008, Pp. 16–20+22–25.
7. Gao Z., Finney C., Daw C., LaClair T. J., Smith D. Comparative Study of Hybrid Powertrains on Fuel Saving, Emissions, and Component Energy Loss in HD Trucks (Article). Vol. 7, Issue 2, 1 October 2014.
8. Metodika raschetov vrednykh vybrosov (sbrosov) dlya kompleksa oborudovaniya otkrytykh gornykh rabot (na osnove udel'nykh pokazateley) [The method of calculation of harmful emissions (discharges) for the complex equipment of open mining works (based on specific indicators)], Lyubertsy, National scientific centre of mining production, Institute of Mining named after A.A. Skochinskogo, 1999, 68 p.
9. Tangaev I. A. *Energoemkost' protsessov dobychi i pererabotki poleznykh iskopaemykh* [Energy intensity of the processes of extraction and treatment of minerals], Moscow, Nedra, 1986, 231 p.
10. Voroshilov G. A., LeI' Yu. I. Energoemkost' transportnykh sistem kar'erov: otsenka i perspektivy [Energy intensity of transport systems of open pits: assessment and prospects]. *Gornaya tekhnika*. 2009, no 1, pp. 42–49. [In Russ].
11. LeI' Yu. I., Musikhina O. V. Energetika kar'ernogo transporta [Energy of open pit transport]. *Innovatsionnyy transport*. 2011, no 1, pp. 34–39. [In Russ].
12. Stepuk O. G., Zuenok A. S. Dizel' trolleyvoznyy transport BELAZ: Perspektivy i ispolneniya v gornom proizvodstve [Diesel electric truck transport BELAZ: Perspectives and performances in the mining industry]. *Gornyy zhurnal*. 2013, no 1, pp. 52–55. [In Russ].
13. Galkin V. I., Sheshko E. E. Perspektivy razvitiya transportnykh sistem v glubokikh kar'erakh [Prospects for the development of taransport systems in deep open pits]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018, pp. 1, pp. 369–379. [In Russ].



## ОТ РЕДАКЦИИ

В Горном информационно-аналитическом бюллетене № 4, 2018 в статье авторов Носенко А.С., Исакова В.С., Домницкого А.А., Зубова В.В. «Разработка погрузочно-транспортных модулей в составе тоннелепроходческого оборудования» на с. 189, 237 допущена техническая ошибка. Приносим авторам свои извинения.

№ стр.	Опубликовано	Должно быть
189, 237	Носенко А.С., Домницкий А.А., Зубов В.В.	Носенко А.С., Исаков В.С., Домницкий А.А., Зубов В.В.