

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЭКСКАВАТОРНО- АВТОМОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

М.А. Маринин¹, Р.А. Рахманов², В.В. Должиков¹, В.И. Сушкова¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru

² Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия

Аннотация: Установлены зависимости влияния параметров взорванной горной массы (ВГМ) – средневзвешенный кусок, индекс однородности и выход некондиционного куска, на производительность вскрышного экскаваторно-автомобильного комплекса (ЭАК) на примере высокопроизводительного электрического канатного экскаватора типа «прямая лопата» WK-35 с емкостью ковша 35 м³ и большегрузного автосамосвала CAT 793D с грузоподъемностью 220 т. Качественные показатели взрывной подготовки массива к выемке определяют основные эксплуатационные характеристики ЭАК – простоя и производительность; это важно учитывать при подборе параметров буровзрывных работ и оптимизации проектов взрыва. Методом циклической фото- и видеофиксации отработки забоя взорванного блока получены данные, позволяющие установить распределение выхода грансостава ВГМ, время цикла погрузки и степень загрузки автосамосвала. При обработке изображений методом фотопланиметрии определены средневзвешенный кусок ВГМ, процент выхода некондиционного куска и индекс однородности грансостава. Методом визуальной обработки изображений с последующей заверкой данными из системы диспетчеризации карьера получены показатели производительности ЭАК WK-35 и CAT 793D. Методами регрессионного и корреляционного анализа установлены зависимости, влияющие на производительность ЭАК при погрузке и параметры ВГМ, позволяющие обеспечивать его высокую производительность в условиях отработки вскрышных участков рудного месторождения.

Ключевые слова: буровзрывные работы, экскавация, взорванная горная масса, производительность, экскаватор WK-35, автосамосвал CAT 793D, экскаваторно-автомобильный комплекс, гранулометрический состав, индекс однородности, некондиционная фракция.

Для цитирования: Маринин М. А., Рахманов Р. А., Должиков В. В., Сушкова В. И. Исследование влияния параметров взорванной горной массы на производительность экскаваторно-автомобильного комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9-1. – С. 35–48. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_35.

Study of the effect of blasted rock mass parameters on the performance of excavator-automobile complex

М.А. Marinin¹, Р.А. Rakhmanov², В.В. Dolzhikov¹, В.И. Sushkova¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru

² Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract: The paper establishes the dependencies of the influence of the parameters of the exploded rock mass (VGM) – average weighted piece, homogeneity index and output of sub-standard piece, on the productivity of the excavator-automotive complex (EAK) on the EAK performance on the example of the WK-35 high-capacity electric Rope Shovel excavator with a bucket capacity of 35 m³ and the CAT 793D heavy-duty dump truck with a load capacity of 220 tons. Quality indicators of blasting preparation of the massif for excavation, determine the main operational characteristics of EAK – downtime and productivity, it is important to consider when selecting the parameters of drilling and blasting operations and optimization of blasting projects. By the method of cyclic photo and video recording of the blasted block face, the data were obtained to establish the distribution of the VGM output, loading cycle time and loading degree of the dump truck. During image processing by the photoplaniometry method, the average weighted piece of the VGM, the percentage of the output of the substandard piece and the homogeneity index of the grading structure were determined. By the method of visual processing of images with the subsequent data verification from the system of dispatching of the open pit we obtained the indicators of productivity of EAK WK-35 and CAT 793D. By regression and correlation analysis methods, the dependences affecting the EAK productivity during loading and the parameters of the VGM, allowing to ensure its high productivity in the conditions of overburden mining in the gold ore deposit, were established.

Key words: drilling and blasting operations, excavation, blasted rock mass, performance, excavator WK-35, dump truck CAT 793D, excavator-automobile complex, fragmentation, uniformity index, substandard fraction.

For citation: Marinin M. A., Rakhmanov R. A., Dolzhikov V. V., Sushkova V. I. Study of the effect of blasted rock mass parameters on the performance of excavator-automobile complex. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(9-1):35-48. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_35.

Введение

Современные условия открытой разработки крупных крутопадающих рудных месторождений подразумевают выемку значительных объемов вскрышных пород [1] и требуют наличие парка высокопроизводительной погрузочной и транспортной техники, стоимость которой может оцениваться в несколько сотен миллионов рублей за единицу, а часовой простой такой техники может достигать нескольких сотен и даже миллионов рублей в час для крупных предприятий.

При этом важным критерием эффективности их эксплуатации является производительность, которая определяет показатели удельных затрат на экскавацию и транспортировку [2, 3].

Зачастую именно от качества взрывной подготовки массива к выемке зависит эффективность использования ЭАК – их простота и производительность. При этом качество взрывных работ отражается и на последующих этапах горного передела [4–7]. В практике горного дела качество подготовленного к выемке блока принято оценивать через выход требуемого среднего куска ВГМ [8, 9]. Проектируемые параметры массового взрыва определяют фактический выход данного показателя [10–13]. Исходя из этого, актуальной задачей горного производства является обоснование оптимальных параметров ВГМ для эффективной эксплуатации ЭАК.

Как показывают труды отечественных [14–17] и зарубежных [18–21] уч-

ных, распределение грансостава ВГМ значительно влияет на производительность ЭАК. Установлено, что с увеличением размера среднего куска и уменьшением коэффициента разрыхления ВГМ удельное сопротивление копанию увеличивается, а коэффициент заполнения ковша уменьшается, что отражается на полезной массе породы в ковше и времени цикла погрузки. На производительность автосамосвала грансостав влияет вторично и отражается на полезной массе породы в кузове и времени простоя под погрузкой. Также отметим, что изменение грансостава ВГМ отражается на энергозатратах при экскавации и скорости износа рабочих механизмов (канаты, зубья, футеровка), а также техническом состоянии рабочих узлов и механизмов, которые в тяжелых условиях забоя могут эксплуатироваться под нагрузкой и иметь повышенный износ.

Проведенный литературный обзор современного состояния изученности проблемы показывает, что выполнено значительное количество исследований влияния качества буровзрывного дробления массива на производительность ЭАК. Так, например, в работе [22] представлены результаты исследований для гидравлического экскаватора типа «обратная лопата» с вместимостью ковша 3 м^3 и автосамосвала грузоподъемностью 30 т. В работе [19] — для погрузчика с объемом ковша 7 м^3 и автосамосвала грузоподъемностью 50 т, в исследовании [23] — для ковша емкостью 10 и 5 м^3 , которые используются для погрузки вскрыши на самосвалах 60 и 85 т. В работе [24] — для гидравлических «прямых лопат» Liebherr с вместимостью ковша 14 и 23 м^3 и автосамосвалов CAT грузоподъемностью 90 и 140 т. В работе [25] — для электрической «прямой лопаты» P&H 4100C с вместимостью ковша 46 м^3 и автосамосвалов CAT грузоподъемностью 220 т.

На производительность ЭАК помимо грансостава влияют также физико-механические характеристики ВГМ (плотность, крепость, коэффициент разрыхления, индекс однородности, угол откоса развала) [13, 26], организационно-технические факторы (конструктивные особенности машины, схема отработки забоя, обеспеченность автосамосвалами, опыт оператора, условия эксплуатации и т.п.), погодно-климатические условия и прочее [27 – 30]. Так, например, специалисты лаборатории оптимизации горных работ Альбертского университета (Канада) в работе [31] отмечают, что поскольку на производительность ЭАК влияет несколько факторов, помимо распределения грансостава, то и модели прогноза производительности должны учитывать большее количество факторов и их влияние друг на друга.

Специалистами Лаврентийского университета (Канада) [19, 32] по результатам полевых и лабораторных исследований установлено, что грузоподъемность ковша зависит от индекса однородности (определяет наклон кумулятивной кривой фрагментации) и средневзвешенного размера фрагментации (прохождение 63%). Исходя из этого, коэффициент заполнения ковша и производительность погрузчика уменьшаются с увеличением среднего размера куска и индекса однородности. При этом в работе [24] представлено достаточное количество полевых измерений для рудных карьеров, подтверждающих отсутствие связи между индексом однородности и временем цикла экскавации (где значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,03$).

В приведенных выше работах зарубежных авторов влияние параметров ВГМ на производительность экскавации оценивалось через время цикла экскавации. В текущем исследовании авторами предложен подход оценки производительности как через время цикла экс-

кавации, так и через полезную загрузку или показатель заполняемости ковша экскаватора и кузова автосамосвала.

Целью данной работы является изучение влияния параметров ВГМ на производительность электрического канатного экскаватора WK-35 типа «прямая лопата» с емкостью ковша 35 м³ и автосамосвала грузоподъемностью 220 т, с установлением средневзвешенного куска ВГМ, обеспечивающего наибольшую производительность данного комплекса в условиях отработки подготовленных буровзрывным способом к выемке вскрышных блоков рудного карьера.

На территории России положительный опыт эксплуатации экскаватора WK-35, Тайюаньского завода тяжелого машиностроения Китая, начал в 2010 г. с разрезов компании «Кузбассразрезуголь» [33]. В 2017 г. Олимпиадинский ГОК и в 2020 г. Лебединский ГОК ввели в эксплуатацию аналогичные китайские экскаваторы WK-35. В настоящее время для крупнейших рудных карьеров России данный экскаватор является самой большой погрузочной машиной.

Производителем WK-35 рекомендуется использование экскаватора с автосамосвалами грузоподъемностью 172 – 326 т. По данным технической документации экскаватора WK-35, номинальная грузоподъемность ковша составляет 65 т. Для оптимальной работы ЭАК важным фактором является правильно подобранное соотношение емкости ковша и кузова. Исходя из принятого критерия вместимости, кузов автосамосвала должен находиться в отношении 4 – 6 объемов ковша экскаватора. Хотя в работе [34] отмечается, что полученная величина рационального количества ковшей до полной загрузки автосамосвала была установлена еще в 60-х годах прошлого столетия и с тех пор значение не корректировалось, однако в то время не было такого разнообразия типоразмеров оборудования.

Методы

Ранее в работе [35] авторами подробно описана методика исследования влияния параметров ВГМ на производительность ЭАК. Методика включает в себя следующие этапы сбора и обработки данных.

На первом этапе в полевых условиях осуществлялся сбор данных методом циклической фото- и видеофиксации отработки забоя взорванного блока экскаватором WK-35 с погрузкой горной массы в автосамосвал CAT 793D. Запись данных проводится непосредственно из кабины машиниста экскаватора, что обеспечивает безопасность работы и автоматизацию процесса.

На втором этапе камеральных работ проводилась оценка грансостава ВГМ и производительности ЭАК при отработке исследуемого блока. Для оценки грансостава производились выборка качественных изображений и их обработка методом фотопланиметрии [16, 36] в специализированном программном продукте «WipFrag». В качестве известного линейного размера, с которым соотносился куски породы, принималась ширина днища ковша экскаватора. Далее строилась кривая распределения грансостава, определялся средневзвешенный кусок ВГМ (63%) и индекс однородности. Пример фотофиксации и обработки изображения приведен на рис. 1.

Для оценки производительности ЭАК с полученных изображений фиксировались данные: время цикла погрузки автосамосвала, количество требуемых ковшей до полной загрузки автосамосвала, масса породы в ковше и автосамосвале. Значения полученных данных с изображений дополнялись данными выгрузки из автоматизированной системы диспетчеризации карьера.

Сбор данных осуществлялся по мере отработки подготовленных буровзрывным способом к выемке 15-метровых

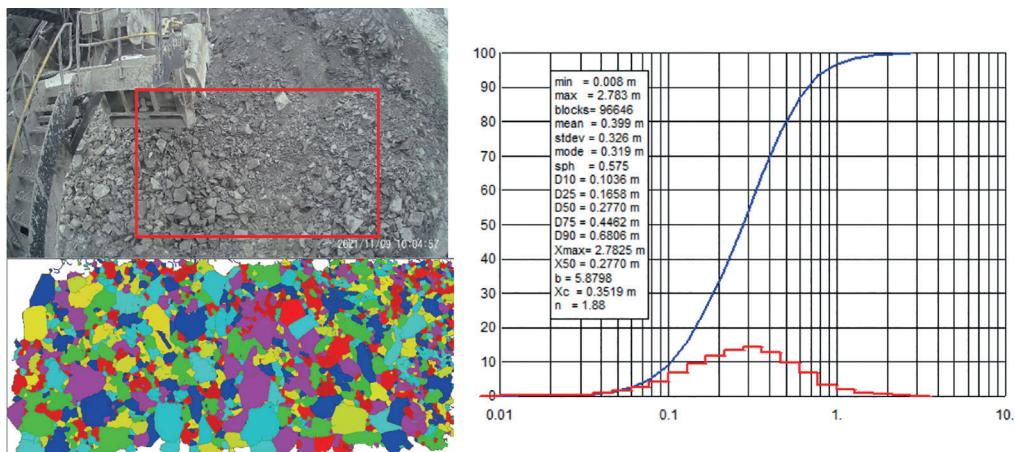


Рис. 1. Выбор и обработка изображения
Fig. 1. Image selection and processing

вскрышных уступов. Для условий вскрышных блоков средняя глубина взрывных скважин составляла 17,5 м с учетом перебора 2,5 м.

Скважины заряжались эмульсионным ВВ марки ВЭТ-700 и инициировались шашкой ПТП-750. Применялись диагональные и врубовые схемы коммутации, которые собраны из номиналов замедлений в эшелоне 42 мс и в контрольном ряду 67 мс.

В табл. 1 приведены основные характеристики пород и принятые параметры БВР по исследованным блокам [37].

В соответствии с паспортом погрузки автосамосвалов CAT 793D экскаваторо-

ром WK-35 с учетом отгрузки вскрышных участков с плотностью породы 2,8 т/м³ загрузка автосамосвала осуществляется в 4 цикла (ковша), а в сложных горнотехнических условиях увеличивается до 5 циклов. В ходе проводимых хронометражных работ были подтверждены паспортные параметры загрузки. При этом было установлено, что изменение в большую сторону средневзвешенного куска ВГМ приводит к появлению 5-го и 6-го ковшей при загрузке автосамосвала, что влечет за собой как увеличение времени цикла погрузки автосамосвала, так и нагрузку на рабочие органы экскаватора.

Таблица 1

Физико-механические характеристики пород и принятые параметры БВР
Physical and mechanical characteristics of rocks and accepted parameters of BVR

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7
Блок №	365-052	350-197	350-194	350-200	350-206	350-203	350-208
Коэффициент крепости	5 – 10	12 – 14	13	10 – 14	5 – 10	5 – 10	7 – 10
Категория трещиноватости	3 – 5	1 – 2	1 – 2	1 – 2	3 – 5	3 – 5	3 – 5
Фактический удельный расход, кг/м ³	1,1	1,21	1,03	1,29	1,13	1,1	1,19
Сетка скважин, м×м	9,1×8	8,6×7,5	7,4×6,4	6,1×5,3	9×7,8	9×7,8	8,6×7,6
Основной диаметр скважин, мм	315	315	245	215	315	315	315

Таблица 2

Параметры экскавации
Excavation parameters

Условия экскавации	Подготовленный массив	Сложные горнотехнические условия
Число циклов погрузки	4	5
Коэффициент разрыхления пород K_p в ковше и кузове автосамосвала	1,35 – 1,5	1,35 – 1,5
Коэффициент наполнения ковша K_h	0,9	0,7
Масса пород в ковше, т	57,8	44,9
Объем породы в ковше, м ³	21	16,3
Объем породы в кузове, м ³	80,2	80,2

Таблица 3

Усредненные данные по блокам

Averaged data by blocks

№ п/п	Ед. изм.	1	2	3	4	5	6	7
Блок №		365-052	350-197	350-194	350-200	350-206	350-203	350-208
Средневзвешенный кусок ВГМ (63%), X_c	мм	370	490	460	540	290	470	420
Значение показателя однородности ВГМ, n		1,73	1,97	1,91	1,73	1,88	1,8	1,99
Выход куска с ребром более 1 м	%	4	5,6	4,8	11	0,9	7,2	2,5
Процент загрузки 4 ковшами	%	93	73	90	82	98	87	94
Масса в ковше для первых трех ковшей	т	61±8	58±9	59±10	59±12	63±9	62±12	62±10
Масса в ковше для полной загрузки кузова	т	56±13	53±12	54±13	54±16	56±14	53±17	56±15
Средняя масса в кузове	т	228±8	223±13	225±10	226±11	228±10	226±9	229±9
Среднее «чистое» время цикла загрузки кузова, $T_{ц.ч.}$	мин	1:51	2:20	2:05	2:15	1:57	1:53	1:57
Среднее фактическое время цикла загрузки кузова, $T_{ц.ф.}$	мин	2:56	3:25	3:10	3:28	3:00	2:52	2:50
«Чистая» минутная производительность, $Q_{мин.ч.}$	т / мин	129	95	108	102	124	116	117
Фактическая минутная производительность, $Q_{мин.ф.}$	т / мин	79	68	69	65	89	76	80
Фактическая часовая производительность по данным системы диспетчеризации, $Q_ч$	м ³ /ч	1795	1540	1665	1386	1755	1586	1767

В табл. 2 приведены принятые на предприятии параметры экскавации.

Обсуждение результатов

Сбор данных по мере отработки блоков (см. табл. 1) проводился в «холодный» период с ноября по декабрь. К последующему анализу приняты данные в общей сложности 30 рабочих смен, полученные со вскрышных экскаваторных забоев WK-35. Сменные значения хронометража работы ЭАК в рамках отработки одного взорванного блока усреднены и сведены в табл. 3.

В смену по исследуемым блокам средневзвешенный кусок ВГМ (X_c) составлял от 300 до 600 мм, значение показателя однородности ВГМ (n) – от 1,62 до 2,12 (где $n = 3$ очень равномерное распределение), выход некондиционного куска с ребром более 1 м (X_h) составил от 0,8 до 14%.

Средняя минутная производительность при погрузке ($Q_{\text{мин}}$) установлена для «чистого» времени цикла ($T_{\text{ч.ф.}}$), где время цикла получено по данным фотовидеофиксации, и для фактического вре-

мени цикла ($T_{\text{ц.ф.}}$), где время цикла получено по данным системы диспетчеризации карьера. Под «чистым» циклом загрузки принят отрезок времени от открытия первого ковша до открытия последнего ковша в цикле загрузки одного автосамосвала.

Часовая производительность работы экскаватора при погрузке получена по данным системы диспетчеризации карьера. Минутная производительность рассчитана по данным хронометража исходя из количества циклов загрузки автосамосвала, погруженной массы породы в тоннах, времени цикла погрузки и имеет следующий вид:

$$Q_{\text{мин}} = \frac{\sum N_i \cdot M_i}{\sum N_i \cdot T_i}, \text{ т/мин}, \quad (1)$$

где N_i – процент загрузки автосамосвала i -м количеством ковшей; M_i – масса ВГМ, загруженной i -м количеством ковшей, т; T_i – время цикла загрузки автосамосвала i -м количеством ковшей, мин.

Установленные по данным хронометража и системы диспетчеризации ка-

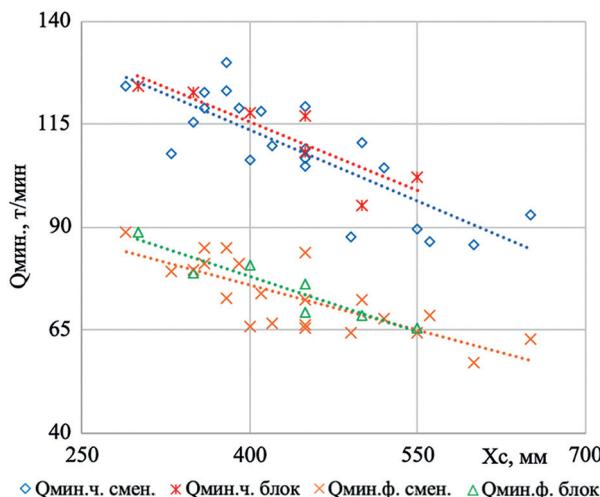


Рис. 2. Зависимость минутной производительности ЭАК от средневзвешенного куска ВГМ по сменам и блокам

Fig. 2. The dependence of the minute performance of the EAC on the weighted average piece of VGM by shifts and blocks

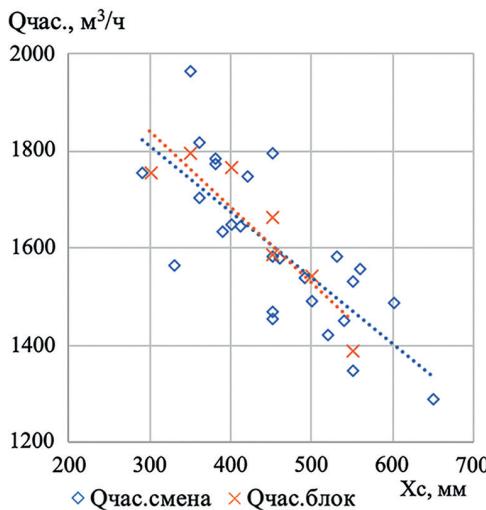


Рис. 3. Зависимость часовой производительности ЭАК от средневзвешенного куска ВГМ по сменам и блокам

Fig. 3. Dependence of hourly output of EAK on average weighted piece of VGM by shifts and blocks

рьера зависимости производительности ЭАК WK-35 и CAT 793D для различного средневзвешенного куска ВГМ представлены на рис. 2 – 4.

«Чистая» минутная производительность экскаватора WK-35 на погрузке автосамосвала CAT 793D от средневзве-

щенного куска ВГМ изменяется линейно и составляет для средневзвешенного куска 0,3 м – 125 т/мин и для 0,6 м – 85 т/мин. Минутная производительность с учетом подготовительных операций изменяется от 90 т/мин для куска 0,3 м до 60 т/мин для куска 0,6 м.

Зависимость времени цикла погрузки от средневзвешенного куска ВГМ по сменам и блокам приведена на рис. 4.

Полученные зависимости свидетельствуют о наличии связи между продолжительностью погрузки и средневзвешенным размером куска ВГМ ($R^2 = 0,6$ – – 0,89). При увеличении средневзвешенного размера куска ВГМ возрастает сопротивление внедрению ковша при черпании, и вследствие этого увеличивается продолжительность рабочего цикла экскаватора. При уменьшении средневзвешенного куска ВГМ с 0,6 до 0,3 м среднее время цикла загрузки автосамосвала уменьшается с 3,5 до 2,5 мин.

При проведении парного корреляционного анализа значение коэффициента детерминации R^2 составляет менее 0,1 для показателя однородности ВГМ *p* и производительности экскаватора, как часовой, так и минутной.

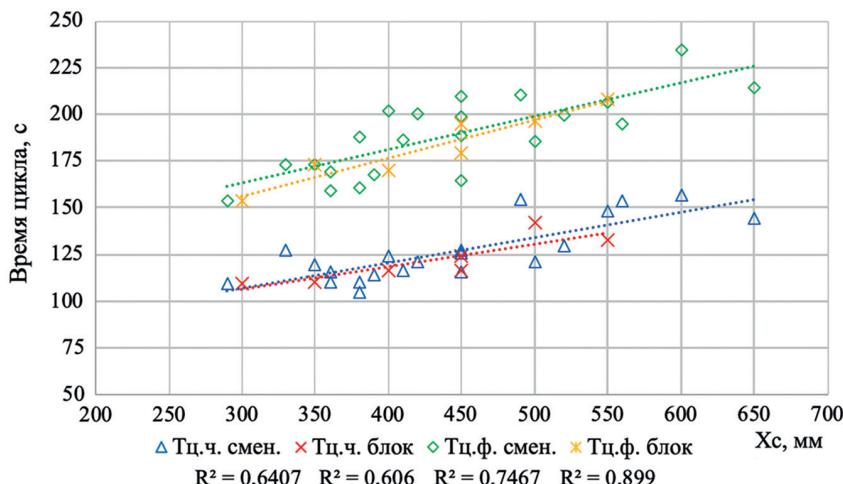


Рис. 4. Зависимость времени цикла погрузки от средневзвешенного куска ВГМ по сменам и блокам

Fig. 4. Dependence of the loading cycle time on the weighted average piece of VGM by shifts and blocks

Таблица 4

Значение коэффициента детерминации R^2 (линейная регрессия)
The value of the coefficient of determination R^2 (linear regression)

Производительность ЭАК	X_c	n	% выхода более 1 м
В смену «Чистая» минутная, $Q_{\text{мин.ч.}}$	0,65	0,05	0,22
Фактическая минутная, $Q_{\text{мин.ф.}}$	0,6	0,01	0,25
Фактическая часовая по данным системы диспетчеризации, Q_c	0,58	0,06	0,51
По блоку «Чистая» минутная, $Q_{\text{мин.ч.}}$	0,78	0,01	0,43
Фактическая минутная, $Q_{\text{мин.ф.}}$	0,88	0,04	0,72
Фактическая часовая по данным системы диспетчеризации, Q_c	0,82	0,09	0,82

Таким образом, в текущем исследовании зависимости между показателем однородности грансостава ВГМ и производительностью ЭАК не наблюдается, что подтверждает выводы работ [23, 24]. В данном исследовании влияние параметров БВР на выход грансостава ВГМ не анализировались.

Заключение

1. В работе приведен анализ влияния параметров ВГМ (средневзвешенный кусок, индекс однородности, выход некондиционного куска) на производительность экскавации (минутную, часовую), время цикла загрузки автосамосвала, количество циклов загрузки, степень загрузки автосамосвала и ковша экскаватора.

2. В рамках текущего исследования установлено, что средневзвешенный кусок ВГМ (63%) является определяющим параметром, влияющим на производительность ЭАК WK-35 и CAT 793D, а индекс однородности ВГМ в пределах от 1,62 до 2,12 и выход фракции более 1 м в ребре в пределах от 0 до 10% не оказывают значительного влияния.

3. Выход средневзвешенного куска ВГМ до 0,4 м позволяет обеспечить па-

спорт погрузки ЭАК WK-35 и CAT793D, а именно загрузку автосамосвала в более чем 90% случаев в 4 цикла при средней массе в ковше 56 т и времени цикла загрузки кузова до 2,5 мин.

4. Хронометраж работы ЭАК WK-35 и CAT 793D показывает, что количество погрузок автосамосвала за 3 цикла по 74 т в условиях средневзвешенного куска ВГМ 0,4–0,6 м практически отсутствует, для 0,3–0,4 м составляет порядка 2% и увеличивается до 10% при выходе средневзвешенного куска ВГМ до 0,3 м.

5. При уменьшении средневзвешенного куска ВГМ с 0,6 м до 0,3 м среднее время цикла загрузки автосамосвала уменьшается с 3,5 мин до 2,5 мин, при этом влияние изменения размера куска на степень загрузки автосамосвалов в рамках исследования не установлено (значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,26$), среднее значение массы в кузове CAT 793D составляет 225 т.

6. Проектируемые параметры массового взрыва следует принимать такими, чтобы они обеспечивали работу ЭАК в соответствии с принятым паспортом и минимальным временем погрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fomin S. I., Ivanov V. V., Semenov A. S., Ovsyannikov M. P. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020, vol. 15, no. 11, pp. 1306–1311.

2. McKee D. Understanding mine to mill. Brisbane Australia: Cooperative research centre for optimising resource extraction, 2013, 96 p.
3. Cameron P., Drinkwater D., Pease J. The ABC of Mine to Mill and metal price cycles / Proceedings of 13th AusIMM Mill Operators' Conference. Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. 2016, pp. 349 – 358.
4. Marinina O. A., Kirsanova N. Y., Nevskaya M. A. Circular economy models in industry: developing a conceptual framework // Energies. 2022, vol. 15, no. 24, pp. 9376 – 9386. DOI: 10.3390/en15249376.
5. Napier-Munn T. Is progress in energy-efficient comminution doomed? // Minerals Engineering. 2015, vol. 73, pp. 1 – 6. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.06.009.
6. Хохлов С. В., Виноградов Ю. И., Носков А. П., Баженова А. В. Прогнозирование смещения рудных контуров при формировании раз渲а взорванной горной массы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 3. – С. 40 – 56. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_40.
7. Жариков И. Ф., Сейнов Н. П. О качестве подготовки взорванной горной массы для схем циклическо-поточной технологии// Взрывное дело. – 2020. – № 126/83. – С. 16 – 27.
8. Егоров В. В., Волокитин А. Н., Угольников Н. В., Соколовский А. В. Обоснование параметров и технологии производства буровзрывных работ, обеспечивающих требуемую кусковатость // Горная промышленность. – 2021. – № 3. – С. 110 – 115. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-110-115.
9. Ишнейский В. А., Мартынушкин Е. А., Васильев А. С., Смирнов С. А. Особенности сбора данных в процессе бурения взрывных скважин для формирования геоструктурных блочных моделей // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13. – № 4(50). – С. 608 – 619. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-608-619.
10. Господариков А. П., Киркин А. П., Трофимов А. В., Ковалевский В. Н. Определение физико-механических свойств горных пород при применении противоударных разгрузочных мероприятий // Горный журнал. – 2023. – № 1. – С. 26 – 34. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.04.
11. Афанасьев П. И., Менжулин М. Г. Изменение среднего размера куска в зоне дробления на основе расчета диссиpации энергии // Известия ТулГУ. – 2022. – № 4. – С. 408 – 419.
12. Afanasev P. I., Makhmudov K. F. Assessment of the parameters of a shock wave on the wall of an explosion cavity with the refraction of a detonation wave of emulsion explosives // Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 9, article 3976. DOI: 10.3390/app11093976.
13. Yastrebova K., Moldovan D., Chernobay V. Influence of the nature of the outflow of explosion products from blast holes and boreholes on the efficiency of rock destruction // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 174, no. 4, article 01017. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401017.
14. Репин Н. Я., Репин Л. Н. Выемочно-погрузочные работы. – М.: Изд-во «Горная книга», 2012. – 267 с. Режим доступа: <https://library.geotar.ru/book/ISBN9785986723174.html>.
15. Koteleva N. I., Khokhlov S. V., Frenkel I. A. Digitalization in open-pit mining. A new approach in monitoring and control of rock fragmentation // Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 22, article 10848. DOI: 10.3390/app112210848.
16. Махараткин П. Н., Абдулаев Э. К., Вишняков Г. Ю., Ботян Е. Ю., Пушкарев А. Е. Повышение эффективности функционирования карьерных автосамосвалов на основе обоснования их рациональной скорости с помощью имитационного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 237 – 250. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_237.
17. Yakovlev V. L., Glebov A. V., Bersenyov V. A., Kulniyaz S. S., Ligotskiy D. N. Influence of an installation angle of the conveyor lift on the volumes of mining and preparing work at quarries at the cyclic-flow technology of ore mining // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. 2020, vol. 4, no. 442, pp. 127 – 137. DOI: 10.32014/2020.2518-170X.93.

18. Jethro M. A., Shehu S. A., Kayode T. S. Effect of fragmentation on loading at Obajana Cement Company Plc, Nigeria // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2016, vol. 7, no. 4, pp. 608 – 620.
19. Singh S. P., Narendrula R. Factors affecting the productivity of loaders in surface mines // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. 2006, vol. 20, no. 1, pp. 20 – 32. DOI: 10.1080/13895260500261574.
20. Manyele S. Investigation of excavator performance factors in an open-pit mine using loading cycle time // Engineering. 2017, vol. 9, pp. 599 – 624. DOI: 10.4236/eng.2017.97038.
21. Doktan M. Impact of blast fragmentation on truck shovel fleet performance / 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey. 2001, pp. 375 – 379.
22. Tosun A., Konak G., Karakus D., Onur A. H., Toprak T. Investigation of the relationship between blasting pile density and loader productivity / Rock Fragmentation by Blasting. 2012, pp. 385 – 389. DOI: 10.1201/b13759-48.
23. Dey S., Mandal S. K., Bhar C. Application of MR and ANN in the prediction of the shovel cycle time, thereby improving the performance of the shovel-dumper operation – A case study // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2022, vol. 122, no. 10, pp. 597 – 606. DOI: 10.17159/2411-9717/1075/2022.
24. Brunton I., Thornton D., Hodson R., Sprott D. Impact of blast fragmentation on hydraulic excavator dig time // Paper presented at the 5th Large Open Pit Conference. 2003, pp. 39 – 48.
25. Beyglou A., Johansson D., Schunnesson H. Target fragmentation for efficient loading and crushing – the Aitik case // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2017, vol. 117, no. 11, pp. 1053 – 1062. DOI: 10.17159/2411-9717/2017/v117n11a10.
26. Isheyskiy V., Martynskin E., Smirnov S., Vasilev A., Knyazev K., Fatyanov T. Specifics of MWD data collection and verification during formation of training datasets // Minerals. 2021, vol. 11, no. 8, article 798. DOI: 10.3390/min11080798.
27. Иванов С. Л., Иванова П. В., Кувшинкин С. Ю. Оценка наработки карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда в реальных условиях эксплуатации // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 228 – 233. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.228.
28. Курганов В. М., Грязнов М. В., Колобанов С. В. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 10 – 21. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.10.
29. Великанов В. С. Прогнозирование нагруженности рабочего оборудования карьерного экскаватора по нечетко-логистической модели // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 29 – 36. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.29.
30. Lange I., Kotiukov P., Lebedeva Y. Analyzing physical-mechanical and hydrophysical properties of sandy soils exposed to long-term hydrocarbon contamination // Sustainability. 2023, vol. 15, no. 4, article 3599. DOI: 10.3390/su15043599.
31. Кутепова Н. А., Мосейкин В. В., Кондакова В. Н., Поспехов Г. Б., Страупник И. А. Особенности инженерно-геологических свойств отходов углеобогащения в связи с их складированием // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12. – С. 77 – 93. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_77.
32. Dotto M. S., Pourrahimian Y. Effects of fragmentation size distribution on truck-shovel productivity. Mining Optimization Laboratory. 2018, pp. 335 – 342.
33. Гетьман С. В. Опыт эксплуатации экскаваторов серии WK производства Тайюаньского завода тяжелого машиностроения TZ // Горная промышленность. – 2013. – № 2. – С. 88 – 91.
34. Хорешок А. А., Дубинкин Д. М., Марков С. О., Тюленев М. А. Оценка степени взаимовлияния вместимости ковша экскаватора и кузова автосамосвала // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 3(145). – С. 104 – 112. DOI: 10.26730/1999-41252021-3-104-112.
35. Маринин М. А., Рахманов Р. А., Аленичев И. А., Афанасьев П. И., Сушкова В. И. Изучение влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на произво-

дительность экскаватора WK-35 // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 6. — С. 111 — 125. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_111.

36. Саадун А., Фредж М., Букарм Р., Хаджи Р. Анализ дробления с использованием цифровой обработки изображений и эмпирической модели (KuzRam): сравнительное исследование//Записки Горного института. — 2022. — Т. 257. — С. 822 — 832. DOI: 10.31897/pmi.2022.84.

37. Аленичев И. А., Рахманов Р. А. Исследование эмпирических закономерностей сброса горной массы взрывом на свободную поверхность уступа карьера // Записки Горного института. — 2021. — Т. 249. — С. 334 — 341. DOI: 10.31897/pmi.2021.3.2. ГИАБ

REFERENCES

1. Fomin S. I., Ivanov V. V., Semenov A. S., Ovsyannikov M. P. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020, vol. 15, no. 11, pp. 1306 — 1311.
2. McKee D. *Understanding mine to mill*. Brisbane Australia: Cooperative research centre for optimising resource extraction, 2013, 96 p.
3. Cameron P., Drinkwater D., Pease J. The ABC of Mine to Mill and metal price cycles. *Proceedings of 13th AusIMM Mill Operators' Conference*. Melbourne, the Australasian Institute of Mining and Metallurgy. 2016, pp. 349 — 358.
4. Marinina O. A., Kirsanova N. Y., Nevskaia M. A. Circular economy models in industry: developing a conceptual framework. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 24, pp. 9376 — 9386. DOI: 10.3390/en15249376.
5. Napier-Munn T. Is progress in energy-efficient comminution doomed? *Minerals Engineering*. 2015, vol. 73, pp. 1 — 6. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.06.009.
6. Khokhlov S. V., Vinogradov Yu. I., Noskov A. P., Bazhenova A. V. Predicting displacements of ore body boundaries in generation of blasted rock pile. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 3, pp. 40 — 56. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_40.
7. Zharkov I. F., Seinov N. P. About the preparation sveby smyrofor mass for schema cycle-potry technology. *Explosion Technology*. 2020, no. 126/83, pp. 16 — 27. [In Russ].
8. Egorov V. V., Volokitin A. N., Ugolnikov N. V., Sokolovskiy A. V. Justification of parameters and technology of drilling and blasting operations to ensure the required lumpiness. *Russian Mining Industry Journal*. 2021, no. 3, pp. 110 — 115. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-110-115.
9. Isheiskiy V. A., Martynushkin E. A., Vasiliev A. S., Smirnov S. A. Data collection features of during the blast wells drilling for the formation of geostructural block models. *Sustainable Development of Mountain Territories this*. 2021, vol. 13, no. 4(50), pp. 608 — 619. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-608-619.
10. Gospodarikov A. P., Kirkin A. P., Trofimov A. V., Kovalevsky V. N. Determination of physical and mechanical properties of rocks using anti-burst destress easures. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 1, pp. 26 — 34. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.04.
11. Afanasev P. I., Menzhulin M. G. Change in the average lump size in the crushing zone based on the calculation of energy dissipation. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2022, no. 4, pp. 408 — 419. [In Russ].
12. Afanasev P. I., Makhmudov K. F. Assessment of the parameters of a shock wave on the wall of an explosion cavity with the refraction of a detonation wave of emulsion explosives. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 9, article 3976. DOI: 10.3390/app11093976.
13. Yastrebova K., Moldovan D., Chernobay V. Influence of the nature of the outflow of explosion products from blast holes and boreholes on the efficiency of rock destruction. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 174, no. 4, article 01017. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401017.
14. Repin N. Y., Repin L. N. *Vyemochno-pogruzochnye raboty* [Excavation and loading works], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2012, 267 p., available at: <https://library.geotar.ru/book/ISBN9785986723174.html>.

15. Koteleva N. I., Khokhlov S. V., Frenkel I. A. Digitalization in open-pit mining. A new approach in monitoring and control of rock fragmentation. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 22, article 10848. DOI: 10.3390/app112210848.
16. Makharatkin P. N., Abdulaev E. K., Vishnyakov G. Y., Botyan E. Y., Pushkarev A. E. Increase of efficiency of dump trucks functioning on the basis of justification of their rational speed by means of simulation modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 237 – 250. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_237.
17. Yakovlev V. L., Glebov A. V., Bersenyov V. A., Kulniyaz S. S., Ligotskiy D. N. Influence of an installation angle of the conveyor lift on the volumes of mining and preparing work at quarries at the cyclic-flow technology of ore mining. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. 2020, vol. 4, no. 442, pp. 127 – 137. DOI: 10.32014/2020.2518-170X.93.
18. Jethro M. A., Shehu S. A., Kayode T. S. Effect of fragmentation on loading at Obajana Cement Company Plc, Nigeria. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2016, vol. 7, no. 4, pp. 608 – 620.
19. Singh S. P., Narendrula R. Factors Affecting the productivity of loaders in surface mines. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. 2006, vol. 20, no. 1, pp. 20 – 32. DOI: 10.1080/13895260500261574.
20. Manyele S. Investigation of excavator performance factors in an open-pit mine using loading cycle time. *Engineering*. 2017, vol. 9, pp. 599 – 624. DOI: 10.4236/eng.2017.97038.
21. Doktan M. Impact of blast fragmentation on truck shovel fleet performance. *17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey*. 2001, pp. 375 – 379.
22. Tosun A., Konak G., Karakus D., Onur A. H., Toprak T. Investigation of the relationship between blasting pile density and loader productivity. *Rock Fragmentation by Blasting*. 2012, pp. 385 – 389. DOI: 10.1201/b13759-48.
23. Dey S., Mandal S. K., Bhar C. Application of MR and ANN in the prediction of the shovel cycle time, thereby improving the performance of the shovel-dumper operation – A case study. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2022, vol. 122, no. 10, pp. 597 – 606. DOI: 10.17159/2411-9717/1075/2022.
24. Brunton I., Thornton D., Hodson R., Sprott D. Impact of blast fragmentation on hydraulic excavator dig time. *Paper presented at the 5th Large Open Pit Conference*. 2003, pp. 39 – 48.
25. Beyglou A., Johansson D., Schunnesson H. Target fragmentation for efficient loading and crushing – the Aitik case. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2017, vol. 117, no. 11, pp. 1053 – 1062. DOI: 10.17159/2411-9717/2017/v117n11a10.
26. Isheyskiy V., Martinyskin E., Smirnov S., Vasilyev A., Knyazev K., Fatyanov T. Specifics of MWD data collection and verification during formation of training datasets. *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 8, article 798. DOI: 10.3390/min11080798.
27. 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, vol. 242, pp. 228 – 233. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.228.
28. Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Kolobanov S. V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 10 – 21. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.10.
29. Velikanov V. S. Mining excavator working equipment load forecasting according to a fuzzy-logistic model. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 29 – 36. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.29.
30. Lange I., Kotiukov P., Lebedeva Y. Analyzing physical-mechanical and hydrophysical properties of sandy soils exposed to long-term hydrocarbon contamination. *Sustainability*. 2023, vol. 15, no. 4, article 3599. DOI: 10.3390/su15043599.
31. Kutepova N. A., Moseykin V. V., Kondakova V. N., Pospehov G. B., Straupnik I. A. Specificity of properties of coal processing waste regarding their storage. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12, pp. 77 – 93. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_77.

32. Dotto M. S., Pourrahimian Y. Effects of fragmentation size distribution on truck-shovel productivity. *Mining Optimization Laboratory*. 2018, pp. 335 – 342.
33. Get'man S. V. Operational experience of WK series excavators manufactured by Taiyuan Heavy Machinery Plant TZ. *Russian Mining Industry Journal*. 2013, no. 2, pp. 88 – 91. [In Russ].
34. Khoreshok A. A., Dubinkin D. M., Markov S. O., Tyulenev M. A. Estimation of the degree of mutual influence of the excavator bucket capacity and haul truck body. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2021, no. 3(145), pp. 104 – 112. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-41252021-3-104-112.
35. Marinin M. A., Rakhmanov R. A., Alenichev I. A., Afanasyev P. I., Sushkova V. I. Effect of grain size distribution of blasted rock on WK-35 shovel performance. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 6, pp. 111 – 125. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_111.
36. Saadoun A., Fredj M., Boukarm R., Hadji R. Fragmentation analysis using digital image processing and empirical model (KuzRam): a comparative study. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 257, pp. 822 – 832. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2022.84.
37. Alenichev I. A., Rakhmanov R. A. Empirical regularities investigation of rock mass discharge by explosion on the free surface of a pit bench. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 249, pp. 334 – 341. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2021.3.2.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маринин Михаил Анатольевич¹ — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5575-9343,

Рахманов Руслан Азаматович — канд. техн. наук,
научный сотрудник, ИПКОН РАН,
e-mail: ruslan1250@mail.ru,
ORCID ID: 000-0002-5341-2274,

Должиков Вадим Владимирович¹ — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: dolzhikov_vv@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8851-2913,

Сушкова Вероника Ивановна¹ — ведущий специалист,
e-mail: s171560@stud.spmi.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Маринин М.А., e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.A. Marinin¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5575-9343,

R.A. Rakhmanov, Cand. Sci. (Eng.), Researcher,
Institute of Problems of Comprehensive Exploitation
of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences,
111020, Moscow, Russia, e-mail: ruslan1250@mail.ru,
ORCID ID: 000-0002-5341-2274,

V.V. Dolzhikov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: dolzhikov_vv@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8851-2913,

V.I. Sushkova¹, Leading Specialist, e-mail: s171560@stud.spmi.ru,

¹ Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: M.A. Marinin, e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 29.06.2023; получена после рецензии 09.08.2023; принята к печати 10.08.2023.

Received by the editors 29.06.2023; received after the review 09.08.2023; accepted for printing 10.08.2023.