

## Оценка влияния неоднородности массива горных пород на результаты взрыва методом фотограмметрии

Д.А. Коптяков<sup>1</sup> ✉, Н.Н. Бочкарев<sup>2</sup>, Т.Ф. Харисов<sup>1</sup>, Д.В. Прищепа<sup>1</sup>, Н.А. Масальский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>2</sup> Уральский асбестовый горно-обогатительный комбинат, г. Асбест, Российская Федерация

✉ koptyakov\_d@mail.ru

**Резюме:** Исследование посвящено фотограмметрическому анализу гранулометрического состава взорванной горной массы с использованием программно-аппаратного комплекса «ГРАВИКС». Актуальность работы выражена необходимостью оперативной оценки кусковатости в условиях геологически неоднородных массивов, характеризующихся анизотропией физико-механических и структурных свойств пород. Цель исследования – охарактеризовать влияние геологических особенностей массива на выход негабаритной фракции и оценить применимость фотограмметрии для производственного контроля буровзрывных работ. В работе выполнен анализ распределения фракций, определена доля негабарита и проведена обработка данных с учётом объёма блоков и геологического описания. Установлено, что доля негабарита возрастает при переходе от пород с продольным волокном к поперечно-волокнистым, что согласуется с показателями дробимости. Наибольший вклад в образование негабарита вносят серпентиниты с крупной сеткой (5,5%) и перидотиты с отороченными жилами (3,2%), а переслаивание приводит к синергетическому ухудшению результатов взрыва. Предложенный подход фотограмметрического анализа в комплексе со структурно-геологическим описанием позволяет оперативно контролировать качество дробления и выявлять закономерности влияния неоднородностей массива на гранулометрический состав, что создаёт основу для целенаправленной оптимизации буровзрывных работ. Полученные результаты демонстрируют, что фотограмметрический анализ выявляет такие закономерности оперативно, без проведения трудоёмких полевых измерений или лабораторных исследований, что повышает управляемость производственного процесса. Новизна исследования заключается в комплексной интерпретации фотограмметрических данных с учётом особенностей асбестоносности массива и обосновании использования комплекса «ГРАВИКС» для оперативного прогнозирования зон повышенного риска формирования крупной фракции.

**Ключевые слова:** гранулометрический состав, обработка изображений, навал породы, фотограмметрия, буровзрывные работы, взорванная горная масса, открытые горные работы, контроль качества взрывов, негабаритная фракция, фракционный состав

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность генеральному директору ООО «ДАВТЕХ» А.В. Дремину за информационную поддержку в вопросах работы ПАК «ГРАВИКС», геологической службе ПАО «Ураласбест» за уточнение описаний образцов горных пород.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания №075-00408-26-00. № гос. рег. 123012300007-7. Тема 3 (2025-2027).

**Для цитирования:** Коптяков Д.А., Бочкарев Н.Н., Харисов Т.Ф., Прищепа Д.В., Масальский Н.А. Оценка влияния неоднородности массива горных пород на результаты взрыва методом фотограмметрии. *Горная промышленность*. 2026;(3):21–28. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-21-28>

## Assessing the effects of rock mass heterogeneity on blasting results using photogrammetry

D.A. Koptyakov<sup>1</sup> ✉, N.N. Bochkaev<sup>2</sup>, T.F. Kharisov<sup>1</sup>, D.V. Prishchepa<sup>1</sup>, N.A. Masalskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Ural Asbestos Mining and Processing Plant, Asbest, Russia Federation

✉ koptyakov\_d@mail.ru

**Abstract:** The study focuses on the photogrammetric analysis of particle-size distribution in the muck pile using the GRAVIX hardware and software suite. The relevance of the work is determined by the need for rapid assessment of particle sizes in conditions of geologically heterogeneous rock masses characterized by anisotropy of physical, mechanical, and structural

properties. The aim of the study is to assess the effects of geological features of the rock mass on the oversized rocks and to evaluate the applicability of photogrammetry for in-process control of the drilling and blasting operations. The study analyzes the distribution of particle size fractions, determines the proportion of oversized rocks, and performs processing of the data with account of the block volumes and geological descriptions. The results show that proportion of the oversized fragments increases when moving from rocks with longitudinal fiber structure to those with the transverse fiber structure, which is consistent with their crushability characteristics. The greatest contribution to formation of oversized rocks comes from serpentinites with coarse grains (5.5%) and peridotites with banded veins (3.2%), whilst interbedding leads to a synergetic deterioration in the blasting results. The proposed approach of photogrammetric analysis, combined with a structural-and-geological description, provides a rapid means of monitoring the fragmentation quality and identifying patterns in how the rock mass heterogeneities affect the particle size distribution, thereby laying the foundation for targeted optimisation of the drilling and blasting operations. The results obtained demonstrate that photogrammetric analysis identifies such patterns promptly without the need for labour-intensive field measurements or laboratory testing, thus improving the management of the production process. The novelty of the research lies in the integrated interpretation of the photogrammetric data with due consideration of the asbestos-bearing features of the rock mass, and in justifying the use of the GRAVIX suite for rapid prediction of zones with higher risks of large-size particle formation

**Keywords:** rock fragmentation, image processing, muckpile, photogrammetry, drilling and blasting, blasted rock mass, open-pit mining, blast quality control, oversized rocks, particle size distribution

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to A.V. Dremin, Managing Director of DAVTEKH LLC, for his information support regarding the operation of the GRAVIX hardware and software suite, and to the geological service of the Uralasbest Industrial Complex for clarifying the descriptions of the rock samples.

The work was performed within the framework of State Contract No.075-00408-26-00. State Reg. No. 123012300007-7. Topic 3 (2025-2027).

**For citation:** Коптыakov D.A., Bochkarev N.N., Kharisov T.F., Prishchepa D.V., Masalskiy N.A. Assessing the effects of rock mass heterogeneity on blasting results using photogrammetry. *Russian Mining Industry*. 2026;(3):21–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-21-28>

## Введение

Оценка взрыва при открытой разработке месторождений характеризуется распределением фракций взорванной горной массы. Неудовлетворительный результат взрыва оказывает влияние на показатели последующих технологических процессов: погрузку, транспортирование и переработку полезного ископаемого [1–4]. Таким образом, оптимизация параметров буровзрывных работ подразумевает формирование необходимого гранулометрического состава [5; 6].

Минимизация содержания негабаритных кусков породы и увеличение доли товарной фракции усложняется с ростом неоднородности массива горных пород. Выявление закономерностей формирования гранулометрического состава в совокупности с геологическим описанием достигается средствами фотограмметрии.

Прямые методы определения гранулометрического состава взорванной горной массы включают визуальные наблюдения, выборочные замеры или ситовой анализ. Их часто связывают с увеличением затрат труда и времени, субъективностью результатов и невозможностью оперативного получения достоверной информации в производственных условиях [7]. В этой связи большее распространение получили бесконтактные методы контроля, основанные на анализе поверхности развала взорванной горной массы [8–11].

Оперативная оценка гранулометрического состава взорванной горной массы может осуществляться на основе анализа цифровых изображений с применением фотограмметрических методов [12–14]. Одним из наиболее активно развивающихся направлений является использование нейронных сетей, позволяющих автоматизировать обработку изображений и повысить точность определения размеров фрагментов. Данный подход реализован

в программно-аппаратном комплексе «ГРАВИКС», который предназначен для определения распределения кусков взорванной породы по размерам в условиях горного производства, а также обеспечивает снижение влияния человеческого фактора при анализе результатов [15–19].

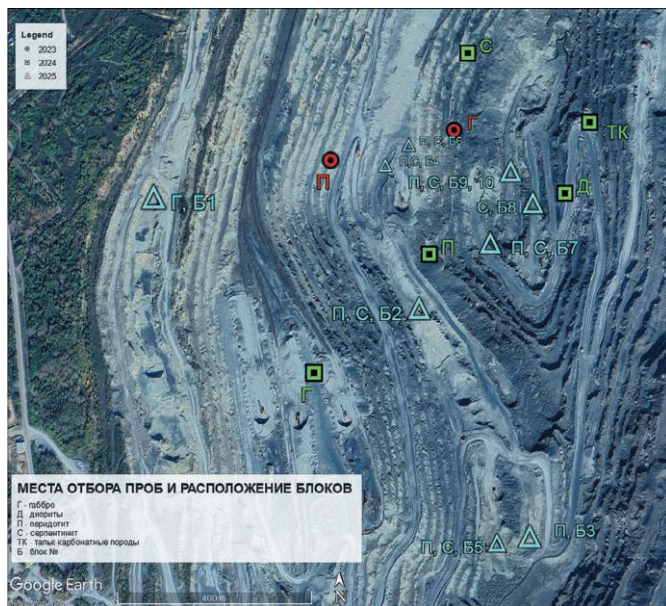
В последние годы наблюдается рост интереса к фотограмметрическим методам анализа гранулометрического состава, однако вопросы сопоставления результатов съёмки и их интерпретация с учётом типа пород, физико-механических свойств и показателей дробимости остаются недостаточно раскрытыми. Особенно в условиях неоднородного строения массива пород, отличающегося анизотропией свойств.

В связи с этим цель исследования заключается в разработке подхода к оперативному контролю гранулометрического состава взорванной горной массы, позволяющего выявлять закономерности влияния неоднородностей разрушаемого массива на распределение фракций для последующей оптимизации буровзрывных работ.

## Объект исследований

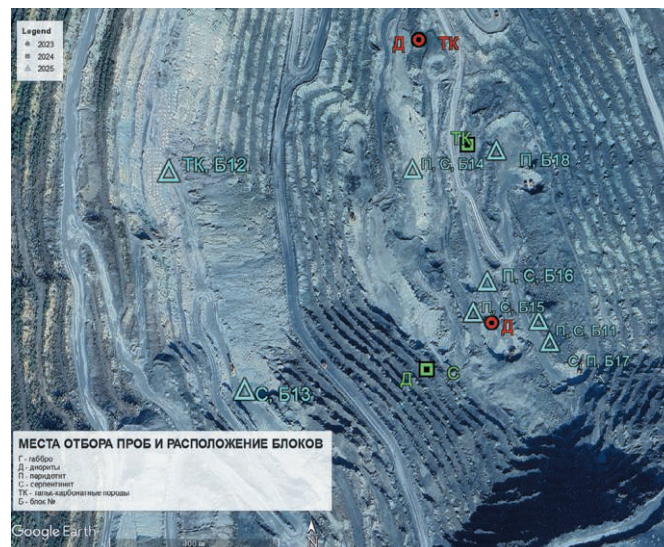
Объектом исследований являлась взорванная горная масса, сформированная в результате буровзрывных работ при открытой разработке месторождения хризотил-асбеста. Для анализа были выбраны участки центрального и южного карьеров (рис. 1, 2), характеризующиеся сложным строением [20] и изменчивостью [21] физико-механических свойств горных пород (табл. 1).

Месторождение приурочено к Баженовскому массиву ультраосновных и основных пород. В пределах изучаемых участков распространены перидотиты, серпентиниты, габбро, диориты и тальк-карбонатные породы. Асбестовые залежи формировались при меридиональных зонах разломов в результате гидротермального метаморфизма.



**Рис. 1**  
Места отбора проб и расположение исследуемых блоков центрального карьера:  
Г – габбро,  
Д – диориты,  
П – перидотиты,  
С – серпентиниты,  
ТК – тальк-карбонатные породы,  
Б – блок,  
О – пробы 2023 г.,  
□ – пробы 2024 г.,  
Δ – пробы 2025 г.

**Fig. 1**  
Sampling sites and the location of the studied blocks of the central open-pit.  
Г – gabbro,  
Д – diorites,  
П – peridotites,  
С – serpentinites,  
ТК – тальк-карбонатные породы,  
Б – block,  
О – samples collected in 2023,  
□ – samples collected in 2024, Δ – samples collected in 2025



**Рис. 2**  
Места отбора проб и расположение исследуемых блоков южного карьера:  
Г – габбро,  
Д – диориты,  
П – перидотиты,  
С – серпентиниты,  
ТК – тальк-карбонатные породы,  
Б – блок,  
О – пробы 2023 г.,  
□ – пробы 2024 г.,  
Δ – пробы 2025 г.

**Fig. 2**  
Sampling sites and the location of the studied blocks of the southern open-pit.  
Г – gabbro,  
Д – диориты,  
П – перидотиты,  
С – серпентиниты,  
ТК – тальк-карбонатные породы,  
Б – блок,  
О – samples collected in 2023,  
□ – samples collected in 2024, Δ – samples collected in 2025

**Таблица 1**  
Прочностные свойства и дробимость пород, слагающих массив месторождения хризотил-асбеста

**Table 1**  
Strength properties and crushability of rocks composing chrysotile asbestos deposits

Наименование пород	Величина отскока $H_r$	Дробимость		Предел прочности, МПа	
		класс	$V_{max}$ , см <sup>3</sup>	при сжатии $\sigma_{сж}$	при растяжении $\sigma_p$
Тальк-карбонаты (ТК)	18.25 ± 4.57	V-VI	8.3 ± 2.2	22.8 ± 7.0	4.99 ± 1.27
Серпентиниты (С)	53.45 ± 9.56	III-IV	3.8 ± 0.9	69.9 ± 21.3	10.60 ± 3.43
Перидотиты (П)	65.27 ± 8.73	II	2.2 ± 0.3	139.0 ± 25.0	16.40 ± 3.20
Габбро (Г)	83.32 ± 13.46	I-II	2.1 ± 0.4	164.0 ± 51.0	25.20 ± 4.30
Диориты (Д)	80.61 ± 11.66	I-II	1.8 ± 0.3	195.0 ± 54.0	19.20 ± 2.90

Главным образом на взрываемость горных пород оказывают влияние структурные особенности массива и его физико-механические свойства [22; 23]. Исследуемые блоки характеризуются разнообразием генезиса, перемежаемостью слабых и вязких пород с породами прочными и склонными к хрупкому разрушению. Кроме этого, распространены многочисленные дайки жильных пород. Асбестоносность встречается поперечно-волокнистая (отороченные жилы, крупная или мелкая сетка) и продольно-волокнистая.

Указанные факторы обуславливают широкий диапазон показателя дробимости и формирование неоднородного гранулометрического состава взорванной горной массы.

Фотограмметрические исследования проводились по

результатам опытно-производственных взрывов, выполненных в 2025 г. На выбранных участках дополнительно отбирались пробы горных пород для лабораторных испытаний и определений прочностных свойств и дробимости [24]. Перечень блоков, выбранных для дальнейшего изучения, приведен в табл. 2.

Выбор блоков основывался на предварительной оценке взрыва. В качестве критерия эффективности буровзрывных работ рассматривалось визуальное соотношение товарной фракции и негабарита во взорванной массе пород.

**Материалы и методы**

Определение гранулометрического состава взорванных блоков выполнялось с использованием программно-аппа-

**Таблица 2**  
Описание исследуемых блоков взорванной горной массы

**Table 2**  
Description of the muck pile blocks

Карьер	Горизонт	Борт	№ блока	Наименование горной породы	Тип асбестоносности в блоке*
Центральный	+182	Восточный	1	Габбро	СК
	-13		2	Перидотит	ПП и ОЖ
	-28	3	СК		
	-28	Западный	4	Перидотит, серпентинит	ОЖ и МС
	-28		5		СК, МС
	-28		6		МС, ОЖ, КС
	-118		7		ОЖ, МС, ПВ, КС, ПП
	-133	Восточный	8	Серпентинит	КС, МС
	-148		9	Перидотит, серпентинит	ОЖ, МС и КС
	-148		10		ОЖ, КС
-133	11		ОЖ, МС и КС		
Южный	+107	Западный	12	Тальк-карбонаты	СК
	+107		13	Серпентинит, диорит, тальк-карбонат	ПП
	-88	Восточный	14	Перидотит, серпентинит	ПП, ОЖ, КС, МС
	-103		15		ПП и ОЖ
	-118		16	Тальк-карбонат, серпентинит	ОЖ, ПП, МС, КС
	-133		17	Серпентинит, перидотит	МС, ОЖ
	-133		18	Перидотит	ОЖ

*Примечание.* СК – скала (перидотит, диорит, габбро), ОЖ – отороченные жилы (перидотит с отороченными жилами), МС – мелкая сетка (серпентинит с мелкой сеткой), КС – крупная сетка (серпентинит с крупной сеткой), ПП – пустая порода (тальк-карбонатная порода, диорит, серпентинит), ПВ – продольное волокно (серпентинит с продольным волокном).  
*Note.* СК – hard rock (peridotite, diorite, gabbro), ОЖ – banded veins (peridotite with banded veins), МС – fine-grains (serpentinite with the fine-grain structure), КС – coarse-grains (serpentinite with the coarse-grain structure), ПП – host rock (talc-carbonate rock, diorite, serpentinite), ПВ – longitudinal fibers (serpentinite with longitudinal fibers).

ратного комплекса «ГРАВИКС». На основе нейросетевых алгоритмов в устройстве реализован метод фотограмметрического анализа разрушенных кусков горной породы. Суть которого сводится к автоматической обработке цифровых изображений поверхности развала горной массы с последующим определением эквивалентных размеров отдельных кусков и построением распределения по фракциям.

Использование фотограмметрии для оценки гранулометрического состава ранее сопоставлялось с прямыми определениями [25]. Отмечалась высокая сходимость данных, полученных прямыми определениями и в результате обработки изображений. При этом трудоемкость и сопутствующие затраты снижаются.

Получение изображений развалов производилось по завершении взрывных работ и стабилизации горной массы, до начала и в процессе погрузочных работ. Съёмка проводилась в производственных условиях при естественном освещении и сопровождалась геологическим описанием взорванной горной массы.

В каждом наблюдении развалу взорванной горной массы присваивались признаки, описывающие тип сырья: вид волокон асбеста, скала, пустая порода.

Для повышения репрезентативности выборки, негабаритные куски складировались в сторону, исключая повторную съёмку. Таким образом, в процессе погрузки взорванной горной массы накоплена информация, отражающая полный объем исследуемых блоков.

По полученным изображениям в автоматическом режиме строился трёхмерный рельеф поверхности развалов, который используется для перевода пиксельных размеров в линейные. С помощью свёрточной нейронной сети автоматически выполняется сегментация изображений для

выделения и классификации отдельных фрагментов горной массы. На основе этих данных определяется гранулометрический состав взорванной породы – количественное распределение кусков взорванной горной массы по размерам (фракциям).

В качестве анализируемых интервалов рассматривались фракции менее 100 мм, целевая товарная фракция 100–600 мм (100–1200 мм) и негабаритная фракция размером более 1200 мм. Рекомендации по значениям интервалов были определены предприятием. Также определено допустимое содержание негабарита – не более 3%.

### Результаты

По каждому блоку были получены данные о выходе фракции в необходимых интервалах. В табл. 3 представлены усредненные значения и стандартное отклонение, проанжированные по содержанию негабаритных кусков.

Наибольшая часть разрушенной породы попадает в целевые значения. В среднем доля товарной фракции составила от 60 до 79% в зависимости от характеристик пород и того, как они перемежаются между собой. Минимальные значения выхода фракции 100–600 мм среди всех блоков изменяются в пределах 33–74%, а максимальные – 80–85%.

Средняя доля выхода фракции >1200 мм варьируется от 0,5 до 9%. В частных наблюдениях отсутствие негабарита отмечалось в блоках 2, 12, 14, 3, 6, 13. Максимум доходил до 28% в 9-м блоке. Минимум среди всех наблюдений меняется от 0 до 1,6%, максимум – от 1 до 28%.

Распределение типа сырья в блоке определялось по количеству наблюдений каждого типа при съёмке развалов. Описанные геологические признаки встречались как от-

Таблица 3  
Фракционный состав и геологическое описание  
развала горных пород

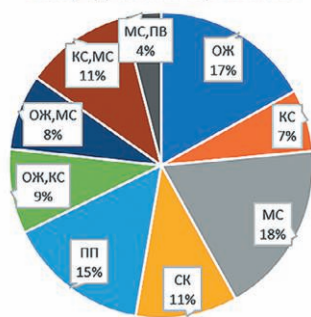
Tabel 3  
Particle size distribution and geological description  
of the muckpiles

№ блока	Объем, тыс. м <sup>3</sup>	Количество наблюдений, шт.	Средний выход фракции мм, %				Распределение типа сырья, %					
			0–100	100–600	600–1200	>1200	С	С	П	П, Г, Д	С, ТК, Д	С
							КС	МС	ОЖ	СК	ПП	ПВ
4	52	7	17 ± 2,4	79 ± 2,6	3,9 ± 0,9	0,5 ± 0,3	-	43	57	-	-	-
13	77,2	15	25 ± 6,9	69 ± 5,3	5,3 ± 2,4	0,5 ± 0,4					100	
12	84,2	6	18 ± 2,1	75 ± 2,8	6,1 ± 1,9	0,7 ± 0,5					100	
2	39,6	3	27 ± 3,9	67 ± 5,8	5,9 ± 1,5	0,94 ± 1,2	33				67	
6	110,1	27	23 ± 9,3	71 ± 7	5,7 ± 4,1	1,2 ± 2,2	6	50	44			
10	31,7	5	15 ± 4,1	76 ± 7,9	7,3 ± 3,3	1,8 ± 1,5	50		50			
16	115,4	23	20 ± 9,1	69 ± 7,3	8,4 ± 4,5	2,0 ± 2,2	10	16	47		27	
3	64,9	25	13 ± 2,9	73 ± 7,9	12 ± 6	2,5 ± 2,5				100		
15	117,1	28	14 ± 2,3	74 ± 9,1	9,5 ± 6,9	2,69 ± 2,88			36	4	61	
5	120,7	28	17 ± 6,7	67 ± 7,6	13 ± 6,4	3 ± 2,5		39		61		
18	51	9	20 ± 8,6	67 ± 7	8,5 ± 2,8	3,3 ± 2,4			100			
1	19,7	7	22 ± 12	61 ± 15	14 ± 10	3,4 ± 2,2				100		
14	109,1	29	17 ± 6,7	69 ± 14	10 ± 10	4,4 ± 6,6	6	22	31		41	
17	58,1	8	23 ± 5,7	65 ± 6,2	7,3 ± 2,6	5 ± 4,4		73	27			
7	125,5	34	15 ± 4,9	64 ± 8,3	16 ± 6,5	5,2 ± 3,3	9	38	38		2	13
11	93,1	28	12 ± 3,5	71 ± 8,8	12 ± 6	5,3 ± 3,9	30	35	35			
8	60,7	29	16 ± 5,8	63 ± 11	15 ± 8,3	6,2 ± 4,5	79	17	3			
9	40,4	14	11 ± 3,8	65 ± 11	15 ± 6,1	8,8 ± 7,6	26	37	37			

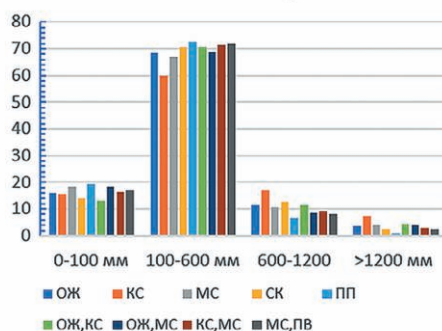
Примечание. КС – крупная сетка (серпентинит с крупной сеткой), МС – мелкая сетка (серпентинит с мелкой сеткой), ОЖ – отороченные жилы (перидотит с отороченными жилами), СК – скала (перидотит, диорит, габбро), ПП – пустая порода (талк-карбонатная порода, диорит, серпентинит), ПВ – продольное волокно (серпентинит с продольным волокном).

Note. КС – coarse-grains (serpentinite with the coarse-grain structure), МС – fine-grains (serpentinite with the fine-grain structure), ОЖ – banded veins (peridotite with banded veins), СК – hard rock (peridotite, diorite, gabbro), ПП – host rock (talc-carbonate rock, diorite, serpentinite), ПВ – longitudinal fibers (serpentinite with longitudinal fibers).

Распределение признаков



Фракционный состав, в зависимости от признаков



Доля содержания негабарита со значением свыше 3%

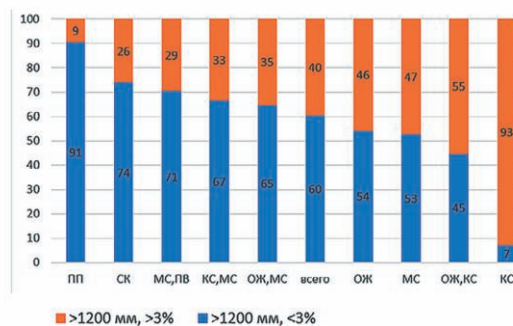


Рис. 3  
Доля негабаритной фракции, превышающей пороговое значение 3%, в зависимости от признака асбестонности

Fig. 3  
Proportion of the oversized rocks exceeding the threshold value of 3%, depending on the asbestos content

дельно, так и совместно, перемежаясь друг с другом. Их распределение среди всех наблюдений представлено на рис. 3.

По пороговому значению содержания негабаритной фракции менее 3% может быть оценен результат взрыва по конкретному блоку. Кроме этого, в зависимости от типа сырья и волокон асбеста могут быть выделены участки массива горных пород с увеличенной вероятностью выхода негабаритной фракции.

Для оценки влияния геологических признаков на формирование негабаритной фракции результаты фотограмметрического анализа были агрегированы по признакам, учитывающим тип сырья и волокон асбеста (табл. 4).

Для каждого признака приведено среднее содержание фракции >1200 мм по всему объему наблюдений. Выявлен устойчивый рост среднего выхода негабаритной фракции при переходе от продольно-волокнистых и мелкосетчатых серпентинитов к крупносетчатым.

**Таблица 4**  
Выход негабаритной фракции в зависимости от наблюдаемого типа волокон асбеста в разрушенном массиве горных пород

**Table 4**  
Proportion of oversized rocks depending on the observed type of asbestos fibers in the blasted rock mass

Наименование горной породы	Тип сырья или волокон асбеста	Среднее содержание фракции >1200 мм
С	Крупная сетка (КС)	5,5
С	Мелкая сетка (МС)	3,5
П	Отороченные жилы (ОЖ)	3,2
П, Г, Д	Скала (СК)	2,39
С, ТК, Д	Пустая порода (ПП)	1,75
С	Продольное волокно (ПВ)	0,7
П, С	ОЖ + КС	4,5
П, С	ОЖ + МС	4
С	КС + МС	2,8
С	МС + ПВ	2,5

**Обсуждение результатов**

Анализ распределения фракций показал, что основная доля разрушенной породы во всех исследованных блоках попадает в целевой диапазон 100–600 мм (100–1200 мм) при среднем значении 60–79%. Это соответствует требованиям производственного процесса и подтверждает общую технологическую эффективность проведённых взрывов.

Вместе с тем значительная вариабельность выхода негабаритной фракции (>1200 мм), колеблющаяся от 0 до 28% в отдельных наблюдениях, свидетельствует о высокой чувствительности процесса разрушения к геологическим факторам. Результаты съёмки развалов хорошо согласуются с лабораторными показателями прочности и дробимости пород: более прочные габбро, перидотиты с отороченными жилами, а также серпентиниты с крупной сеткой демонстрируют тенденцию к формированию более крупных фрагментов.

Агрегирование данных по геологическому описанию позволило количественно охарактеризовать зависимость между типом волокон асбеста и формированием негабаритной фракции. Наименьшие значения выхода >1200 мм характерны для серпентинитов с продольным волокном, что объясняется их относительно низкой прочностью и направлением волокон.

По мере укрупнения и изменения направленности волокон асбеста наблюдается рост среднего выхода негаба-

рита. Показательно поведение серпентинитов с крупной сеткой. Предполагается, что крупносетчатые серпентиниты формируют более монолитные участки массива, менее подверженные дроблению при стандартных параметрах БВР.

Увеличение выхода негабарита также наблюдается при сочетании нескольких признаков в пределах одного блока (например, ОЖ+КС или ОЖ+МС), что указывает на усложнение структуры массива и, как следствие, неравномерность распределения энергии взрыва. Таким образом, перемежаемость серпентинитов и перидотитов является фактором ухудшения гранулометрического состава.

При оценке взрывов недостаточно учитывать только технические параметры (удельный расход ВВ, сетку бурения); необходим учет структурно-геологических особенностей блока. В противном случае возможна некорректная интерпретация причин ухудшения показателей дробления.

Выявление взаимосвязи параметров БВР и трещиноватости разрушаемого массива горных пород с полученными результатами необходимо при последующих исследованиях.

**Заключение**

В результате выполненных исследований решена задача оперативного контроля гранулометрического состава взорванной горной массы с учетом неоднородностей массива горных пород. Показано, что программно-аппаратный комплекс «ГРАВИКС» обеспечивает получение необходимого объема информации о гранулометрическом составе развала пород в производственных условиях.

Получены количественные распределения выхода фракций для оценки результатов ведения БВР. Агрегирование информации по геологическим признакам показало рост среднего выхода негабаритной фракции при переходе от продольно-волоконистого и мелкосетчатого асбеста к крупносетчатому. Наибольший вклад в образование негабарита вносят серпентиниты с крупной сеткой (5,5%) и перидотиты с отороченными жилами (3,2%), а переслаивание приводит к синергетическому ухудшению результатов взрыва.

Предложенный подход фотограмметрического анализа в комплексе со структурно-геологическим описанием позволяет оперативно контролировать качество дробления и выявлять закономерности влияния неоднородностей массива на гранулометрический состав, что создаёт основу для целенаправленной оптимизации буровзрывных работ.

Полученные результаты демонстрируют, что фотограмметрический анализ выявляет такие закономерности оперативно, без проведения трудоёмких полевых измерений или лабораторных исследований, что повышает управляемость производственного процесса.

**Список литературы / References**

1. Kinyua E.M., Jianhua Z., Kasomo R.M., Mauti D., Mwangangi J. A review of the influence of blast fragmentation on downstream processing of metal ores. *Minerals Engineering*. 2022;186:107743. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107743>
2. Антропов Л.А., Девяткин Ю.А., Петровых Л.В. Методика определения технико-экономического показателя – интенсивности процесса черпания взорванных скальных пород из осыпи. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(11-2):39–51. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_112\\_0\\_39](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_112_0_39)  
Antropov L.A., Devyatkin Yu.A., Petrovykh L.V. Methodology for determining the technical and economic indicator – the intensity process of scooping blasted rocks from the hillside waste. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(11-2):39–51. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_112\\_0\\_39](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_112_0_39)

3. Маринин М.А., Рахманов Р.А., Аленичев И.А., Афанасьев П.И., Сушкова В.И. Изучение влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на производительность экскаватора WK-35. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(6):111–125. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_6\\_0\\_111](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_6_0_111)  
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. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(6):111–125. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_6\\_0\\_111](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_6_0_111)
4. Жариков С.Н., Кутуев В.А. Взаимосвязи между технологическими процессами добычи полезных ископаемых на открытых горных работах. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2022;14(3):479–485.  
Zharikov S.N., Kutuev V.A. Interrelations between technological processes of open-pit mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022;14(3):479–485. (In Russ.)
5. Доможиров Д.В., Пыталев И.А., Носов И.И., Носов В.И. Повышение качества дробления и оптимизации параметров буровзрывных работ при применении эмульсионных ВВ и высокоуступной технологии добычи на рудных месторождениях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;(S36):35–42.  
Domozhiron D.V., Pytalev I.A., Nosov I.I., Nosov V.I. Improving of the quality of fragmentation and optimization of drilling and blasting parameters in the application of emulsion explosives and mining technology of high ledges on ore deposits. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2016;(S36):35–42. (In Russ.)
6. Abbaspour H., Drebenstedt C., Badroddin M., Maghaminik A. Optimized design of drilling and blasting operations in open pit mines under technical and economic uncertainties by system dynamic modelling. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018;28(6):839–848. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.06.009>
7. Nanda S., Naik H.K. A review of the blast fragmentation analysis techniques used in surface mines. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2023;71(12):2445–2454. <https://doi.org/10.18311/jmmf/2023/28601>
8. Bahraini M.S., Atighi I. A novel intelligent stereo vision approach for blast-induced fragmentation size distribution: Case study at Golgohar open-pit mine, Iran. *Minerals Engineering*. 2024;215:108822. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108822>
9. Singh B.K., Mondal D., Shahid M., Saxena A., Roy P.N.S. Application of digital image analysis for monitoring the behavior of factors that control the rock fragmentation in opencast bench blasting: A case study conducted over four opencast coal mines of the Talcher Coalfields, India. *Journal of Sustainable Mining*. 2019;18(4):247–256. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.08.003>
10. 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;257:822–832. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.84>  
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;257:822–832. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.84>
11. Rai P., Sharma S.K. Evaluation of coal chip size cut by surface miners using digitized measurement and physical validation techniques – A case study. *Measurement*. 2025;252:117280. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117280>
12. Wang Y., Wang X., Tang Y., Dai X., Dong J., Si G. From laboratory to field: normal map-aided multimodal instance segmentation for blasting fragmentation analysis. *Advanced Engineering Informatics*. 2026;71(Part B):104319. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2026.104319>
13. Sharma M., Choudhary B.S., Raina A.K., Khandelwal M., Rukhiyar S. Prediction of rock fragmentation in a fiery seam of an open-pit coal mine in India. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024;16(8):2879–2893. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.11.047>
14. Виноградов Ю.И., Хохлов С.В., Баженова А.В., Соколов С.Т. Методические принципы измерения кусковатости горной массы. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020;(3):112–123.  
Vinogradov Yu.I., Khokhlov S.V., Bazhenova A.V., Sokolov S.T. Methodological principles of measuring granulometric composition. *Izvestiya Tulkogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2020;(3):112–123. (In Russ.)
15. Дремин А.В., Великанов В.С. К вопросу о гранулометрическом составе взорванных скальных пород. *Горная промышленность*. 2023;(4):73–78. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-73-78>  
Dremin A.V., Velikanov V.S. Regarding the particle-size composition of blasted rocks. *Russian Mining Industry*. 2023;(4):73–78. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-73-78>
16. Великанов В.С., Чернухин С.А., Тельминов Н.С., Дремин А.В., Ломовцева Н.В., Ситдикова С.В. О влиянии гранулометрии взорванной горной массы на распределение напряжений в рабочем оборудовании карьерного экскаватора. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2024;22(4):30–43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-30-43>  
Velikanov V.S., Chernukhin S.A., Telminov N.S., Dremin A.V., Lomovtseva N.V., Sitdikova S.V. On the influence of the granulometry of blasted rock mass on the stress distribution in the working equipment of a quarry excavator. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2024;22(4):30–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-30-43>
17. Великанов В.С., Дремин А.В., Чернухин С.А., Ломовцева Н.В. Технологии нейронных сетей в интеллектуальном анализе данных гранулометрического состава взорванных пород. *Горная промышленность*. 2024;(4):90–94. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-90-94>  
Velikanov V.S., Dremin A.V., Chernukhin S.A., Lomovtseva N.V. Neural network technologies in mining data on particle size distribution of muck pile rocks. *Russian Mining Industry*. 2024;(4):90–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-90-94>

18. Дремин А.В., Великанов В.С. Цифровые технологии для взрывных работ: интеллектуальный автономный программно-аппаратный комплекс компании «Давтех» для анализа гранулометрического состава горных пород. *Горная промышленность*. 2023;(6):57–62. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-57-62>  
Dremin A.V., Velikanov V.S. Digital technologies in blasting: DAVTECH's intelligent autonomous hardware-andsoftware suite for analyzing particle size distribution of rocks. *Russian Mining Industry*. 2023;(6):57–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-57-62>
19. Дремин А.В., Ситдикова С.В., Великанов В.С., Стожков Д.С., Гришин И.А. Анализ кусковатости горных пород в реальном времени с использованием отечественного программно-аппаратного обеспечения. *Горная промышленность*. 2025;(3):118–123. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-118-123>  
Dremin A.V., Sitdikova S.V., Velikanov V.S., Stozhkov D.S., Grishin I.A. Real-time analysis of particle size distribution of rocks using a domestic software and hardware complex. *Russian Mining Industry*. 2025;(3):118–123. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-118-123>
20. Алексеев А.Ф., Грязнов О.Н. Физико-механические свойства метасоматитов серпентинитовой формации Баженовского месторождения хризотил-асбеста. *Инженерная геология*. 2013;(4):54–59.  
Alekseev A.F., Gryaznov O.N. Physical-mechanical characteristics of the serpentinite formation metasomatites of the Bazhenovskoye chrysotile-asbestos deposit. *Engineering Geology World*. 2013;(4):54–59. (In Russ.)
21. Корнилков С.В., Харисов Т.Ф., Масальский Н.А., Коптяков Д.А. Исследование физико-механических свойств пород прибортового массива карьера ПАО «Ураласбест». *Проблемы недропользования*. 2025;(1):16–24. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2025.01.016>  
Kornilkov S.V., Kharisov T.F., Masalskiy N.A., Koptiyakov D.A. Research of the physico-mechanical properties of rocks of the nearboard array of the quarry of PJSC “Uralasbest”. *Problems of Subsoil Use*. 2025;(1):16–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2025.01.016>
22. Дунаев В.А., Ермолов В.А. Геологические факторы, влияющие на взрываемость горных пород при открытой разработке полезных ископаемых. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 1999;(1):11–16.  
Dunaev V.A., Ermolov V.A. Geological factors affecting the blastability of rocks in open-pit mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 1999;(1):11–16. (In Russ.)
23. Латышев О.Г. *Разрушение горных пород*. М.: Теплотехник; 2007. 660 с.
24. Авдеев А.Н., Боцкарев Н.Н., Коптяков Д.А., Масальский Н.А., Харисов Т.Ф. Метод экспресс-оценки дробимости горных пород с помощью склерометра. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2025;(2):35–41. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20250204>  
Avdeev A.N., Bochkarev N.N., Koptiyakov D.A., Masal'skiy N.A., Kharisov T.F. Rapid testing of rock crushability using hardness meter. *Journal of Mining Science*. 2025;61(2):194–200. <https://doi.org/10.1134/S1062739125020048>
25. Bamford T., Esmaeili K., Schoellig A.P. A deep learning approach for rock fragmentation analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021;145:104839. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104839>

**Информация об авторах**

**Коптяков Дмитрий Александрович** – научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: koptiyakov\_d@mail.ru

**Боцкарев Николай Николаевич** – ведущий инженер технического отдела, ПАО «Уральский асбестовый горно-обогачительный комбинат», г. Асбест, Российская Федерация

**Харисов Тимур Фаритович** – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

**Прищепа Дмитрий Вячеславович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

**Масальский Николай Александрович** – младший научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 14.02.2026

Поступила после рецензирования: 24.03.2026

Принята к публикации: 08.04.2026

**Information about the authors**

**Dmitry A. Koptiyakov** – Researcher, Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: koptiyakov\_d@mail.ru

**Nikolay N. Bochkarev** – Leading Engineer of Technical Department, Ural Asbestos Mining and Processing Plant PJSC, Asbest, Russia Federation

**Timur F. Kharisov** – Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

**Dmitry V. Prishchepa** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

**Nikolay A. Masalskiy** – Junior Researcher, Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

**Article info**

Received: 14.02.2026

Revised: 24.03.2026

Accepted: 08.04.2026