

УДК 004.932:621.921

DOI 10.62595/1819-5245-2025-1-85-92

ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ КАРБИДА КРЕМНИЯ ПО ФОТОГРАФИЯМ СРЕЗОВ ОБРАЗЦОВ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Е. В. СОБОЛЕВ

Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь

Разработана методика определения размеров частиц карбида кремния по фотоизображениям срезов образцов керамических изделий. Методика базируется на оценке линейных размеров частиц посредством обработки и фильтрации фото срезов образцов керамических изделий при помощи набора алгоритмов обработки изображений, за счет различного контраста частиц наполнителя (карбида кремния) и связующей массы. В качестве апробации предложенного подхода проведено исследование фотографий образцов керамической подовой плиты и направляющей для печи Seco-warwick. Определены описательные статистики для максимальных линейных размеров частиц карбида кремния и дана ориентировочная оценка гранулометрического состава.

Ключевые слова: карбид кремния, гранулометрический состав, анализ изображений.

Для цитирования. Соболев, Е. В. Оценка размеров частиц карбида кремния по фотографиям срезов образцов керамических изделий / Е. В. Соболев // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 1 (100). – С. 85–92. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-1-85-92

ESTIMATION OF SILICON CARBIDE PARTICLE SIZES FROM PHOTOGRAPHS OF CERAMIC SAMPLE SECTIONS

Y. V. SOBALEU

Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus

A method for determining the particle sizes of silicon carbide from photo images of ceramic sample sections has been developed. The method is based on estimating the linear sizes of particles by processing and filtering photo sections of ceramic sample sections using a set of image processing algorithms, due to the different contrast of filler particles (silicon carbide) and binder mass. As a test of the proposed approach, a study of photographs of samples of a ceramic hearth plate and a guide for a Seco-warwick kiln was conducted. Descriptive statistics for the maximum linear sizes of silicon carbide particles were determined and an approximate estimate of the granulometric composition was given.

Keywords: silicon carbide, granulometric composition, image analysis.

For citation. Sobaleu E. V. Estimation of silicon carbide particle sizes from photographs of ceramic sample sections. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo.* – 2025. – № 1 (100). – P. 85–92. DOI 10.62595/1819-5245-2025-1-85-92

Введение

Современные методы и алгоритмы обработки изображений являются неотъемлемой частью научно-технических работ и позволяют с достаточной точностью определять различные признаки исследуемых объектов. Для определения линейных параметров объектов на фотографиях применяются алгоритмы обработки изображений и методы искусственного интеллекта.

В работах [1, 2] приведен алгоритм автоматизации фотопланиметрического анализа результатов буровзрывных работ, позволяющий определить фракционный состав взорванной горной массы. Предложенный авторами подход основан на алгоритме выделения контуров, что позволяет уменьшить трудоемкость и повысить точность результатов по отношению к ручному анализу. Однако авторы отмечают малую точность самого метода обработки фотопланов. Увеличение точности методов классификации и определения гранулометрического состава горной руды описаны в исследованиях с применением нейронных сетей [3, 4].

В области разработки функциональных керамических материалов гранулометрический состав имеет особое значение и очень часто строго нормируется при производстве. Классически определение размера и процентного соотношения фракций частиц осуществляется ситовым методом [5, 6] на стадии заготовки исходной шихты. Однако при разработке новых материалов и оценке качества и параметров выпускаемой технической керамики практический интерес представляет оценка размера и соотношения частиц готовых изделий. Наличие подобной возможности приобретает особую актуальность при использовании дорогостоящих материалов, например, карбида кремния, за счет возможности оценки начальных условий и последующей минимизации итерационного процесса создания новых материалов.

Цель настоящего исследования – разработка и апробация алгоритма оценки размеров частиц карбида кремния по фотоизображениям срезов образцов керамической подовой плиты и направляющей для печи Seco-warwick.

Методика исследования

Гипотеза заключается в том, что линейные размеры частиц карбида кремния могут быть оценены посредством обработки и фильтрации фото срезов образцов керамической подовой плиты при помощи набора алгоритмов обработки изображений, за счет различного контраста частиц наполнителя (карбида кремния) и связующей массы.

В качестве исходных данных были получены фотографии и линейные размеры срезов образцов керамических изделий. Алгоритм последующих действий можно разделить на этапы:

- 1) предварительная обработка фотоизображений срезов керамики (очистка изображения, наложение маски на участки с дефектами, регулировка цвета, обесцвечивание);
- 2) оценка масштаба изображения – расчет линейного размера одного пикселя изображения в миллиметрах;
- 3) преобразование обесцвеченного изображения в массив данных $[x, y, [r, g, b]]$;
- 4) преобразование двумерного массива изображения из пространства RGB в одноканальное псевдоцветовое пространство для повышения контрастности и более наглядного представления данных. В результате данные каждого пикселя изображения преобразуются в числовой формат в диапазоне $[0, 255]$;
- 5) обрезка исследуемого участка изображения;
- 6) преобразование исследуемого участка изображения в маску яркости. На данном этапе подбирается пороговое значение яркости, а исследуемый участок изображения преобразуется в маску со значениями 0 и 1, где 1 – пиксели, предположительно относящиеся к искомым частицам карбида кремния, 0 – отбрасываемые пиксели. В результате искомые участки изображения представляются в виде агломератов пикселей;
- 7) заполнение пропусков в агломератах пикселей;
- 8) фильтрация шумов по площади агломератов пикселей;
- 9) расчет линейных размеров агломератов в пикселях и миллиметрах;
- 10) оценка гранулометрического состава.

Этапы 2–10 были автоматизированы на языке python с использованием библиотек numpy, pandas, scipy, skimage. Для визуализации изображений и результатов использовалась библиотека matplotlib.

Обсуждение результатов

В качестве первого исследуемого образца был принят срез куба (рис. 1, *а*) с линейным размером 23 мм, что соответствует 1090 px на исходном фото. Масштаб одного пикселя – 0,0211 мм. Предварительная обработка фотоизображения (этап 1) и исследуемый участок (этап 5) с размерами 550 × 400 px представлены на рис. 1, *б*.

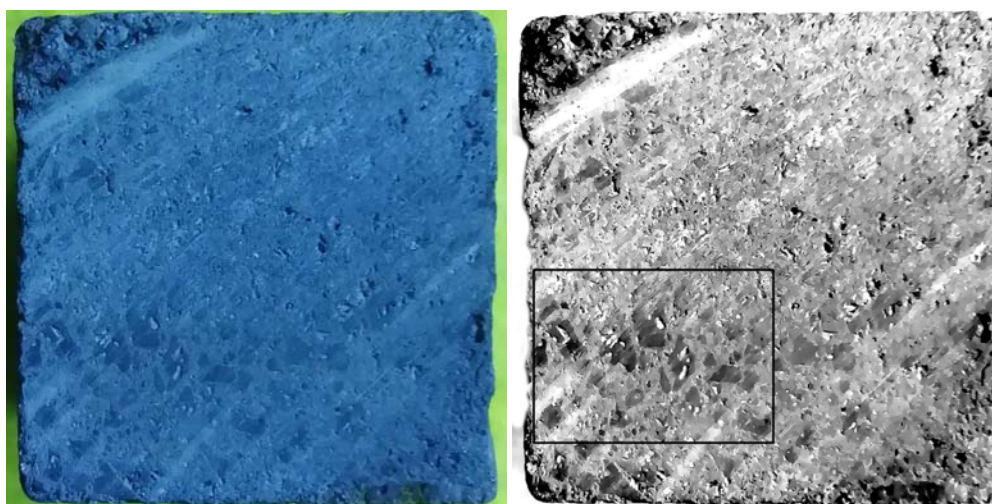
*а)**б)*

Рис. 1. Образец № 1:

а – фотография среза; *б* – предварительная обработка фотоизображения и исследуемый участок

Результат преобразования двумерного массива исследуемого участка изображения из пространства RGB в одноканальное псевдоцветовое пространство представлен на рис. 2, *а*. Также на рис. 2 представлены варианты масок яркости (этап 6) исследуемого участка изображения с различными пороговыми значениями. При пороговом значении менее 90 (рис. 2, *б*) происходит уменьшение площади искомых агломератов пикселей, а при значениях более 130 (рис. 2, *в*) наблюдается слияние соседних отдельных агломератов пикселей. Для дальнейшего исследования была принята маска яркости с пороговым значением 110 (рис. 2, *г*).

Результат работы алгоритма заполнения пропусков (этап 7) в агломератах пикселей принятой маски яркости (рис. 2, *г*) представлен на рис. 3, *а*. На маске присутствуют явно выраженные агломераты пикселей, соответствующие частицам карбида кремния, а также значительное количество шумов с меньшей площадью, соответствующих порам материала или дефектам исходного фото. Для фильтрации шумов (этап 8) проводилась программная нумерация, а также расчет линейных размеров и площади полученных агломератов пикселей. Для более наглядного выбора порога фильтрации была построена диаграмма рассеяния между максимальной длиной и площадью агломератов пикселей (рис. 4). Наблюдается положительная экспоненциальная зависимость между двумя параметрами. За пороговое значение фильтрации шумов была принята площадь 500 px². Итоговая маска представлена на рис. 3, *б*, а соответствующая ей диаграмма рассеяния на рис. 4, *б*.

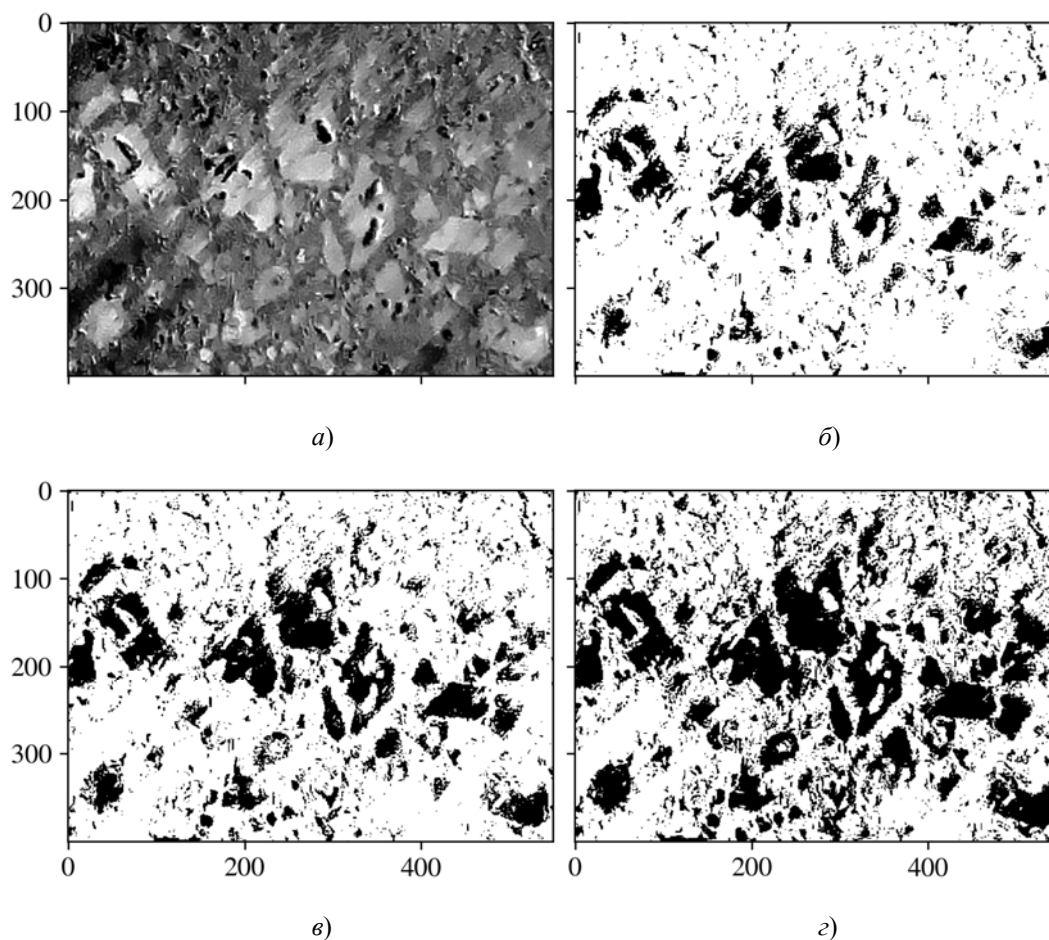


Рис. 2. Исследуемый участок изображения в одноканальном псевдоцветовом пространстве (а) и соответствующие ему маски яркости с пороговыми значениями 90 (б), 110 (в) и 130 (г) в бинарной цветовой палитре

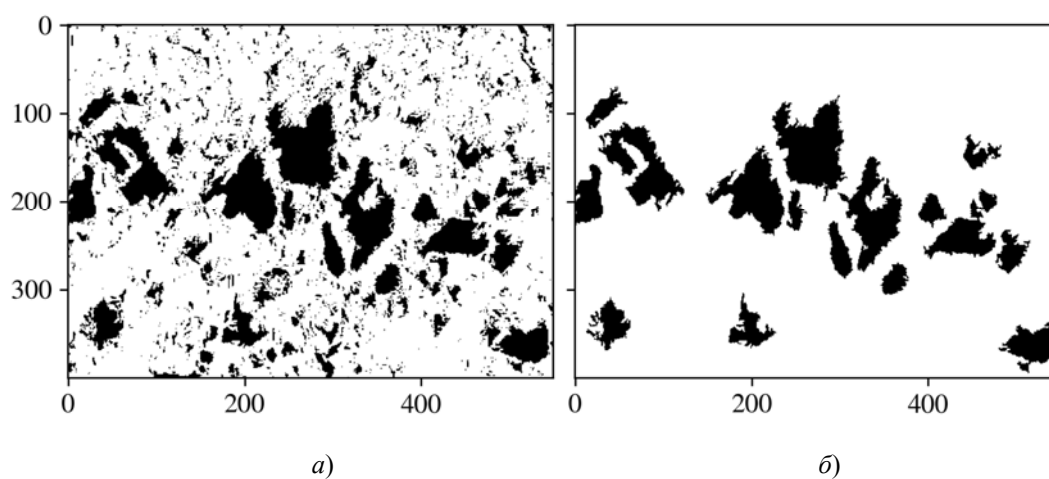


Рис. 3. Этапы обработки исследуемого участка изображения:
 а – маска с заполненными пропусками в агломератах пикселей;
 б – итоговая маска с отфильтрованными шумами

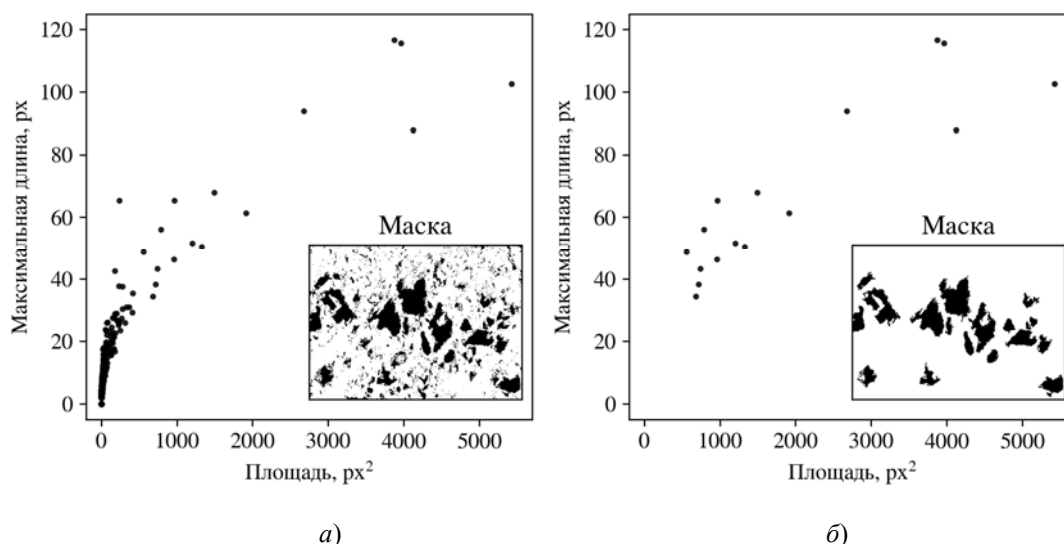


Рис. 4. Диаграмма рассеяния между максимальным линейным размером и площадью агломератов пикселей образца № 1:
 а – начальная маска (объем выборки – 1925 значений);
 б – отфильтрованная маска (объем выборки – 16 значений)

Объем исходной выборки для образца № 1 (зашумленная маска – рис. 3, а) сократился с 1925 до 16 значений. Среднее значение максимального линейного размера агломератов пикселей итоговой маски составило 1,42 мм при стандартном отклонении 0,57, минимальное значение – 0,72 мм, максимальное значение – 2,46 мм.

В качестве второго исследуемого образца был принят срез плиты подовой (рис. 5, а) с линейным размером 34,4 мм, что соответствует 1703 px на исходном фото. Масштаб одного пикселя – 0,0202 мм. Так как на изображении образца присутствуют в значительном количестве дефекты, использовалась маска, выделяющая участки с явным наличием искомых частиц и маскирующая дефекты. На рис. 5, б представлена предварительная обработка фотоизображения (этап 1) и исследуемый участок (этап 5) с размерами 1407 × 980 px.

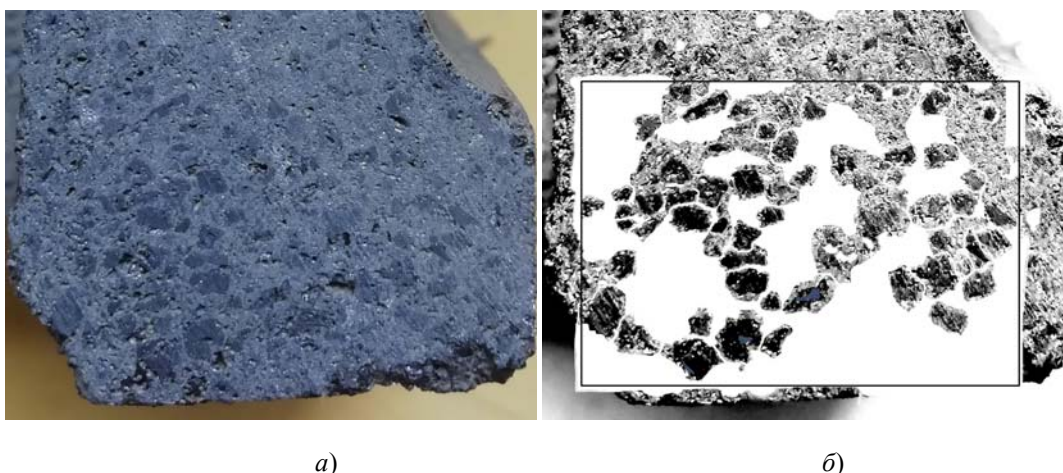


Рис. 5. Образец № 2:
 а – фотография среза; б – предварительная обработка фотоизображения и исследуемый участок

Последующие этапы анализа аналогичны исследованию образца № 1. Для образца № 2 были приняты: маска яркости – 110; пороговое значение фильтрации шумов по площади – 600 px^2 . Исходная и итоговая маски и соответствующие им диаграммы рассеяния представлены на рис. 6.

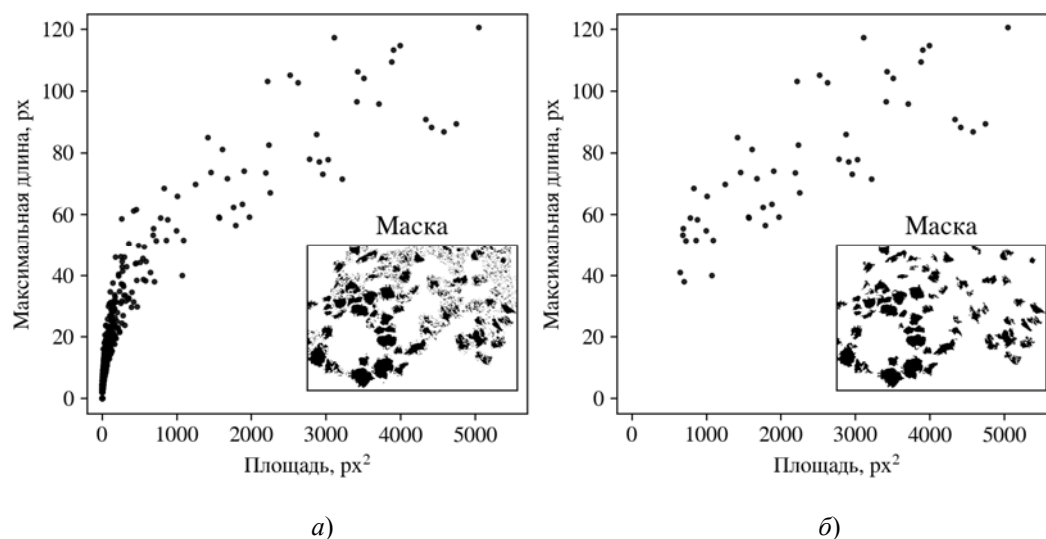


Рис. 6. Диаграмма рассеяния между максимальным линейным размером и площадью агломератов пикселей образца № 2:

a – начальная маска (объем выборки – 4443 значений);
б – отфильтрованная маска (объем выборки – 63 значений)

Объем исходной выборки для образца № 2 (зашумленная маска – рис. 6, *a*) сократился с 4443 до 63 значений. Среднее значение максимального линейного размера агломератов пикселей итоговой маски составило 1,81 мм при стандартном отклонении 0,69, минимальное значение – 0,77 мм, максимальное значение – 3,36 мм.

Сводный гранулометрический состав (этап 10) по двум образцам представлен в таблице. Ориентировочное соотношение зернистостей по ГОСТ и FEPA выполнены согласно данным производителей абразивных материалов [7]. Объемом выборки – 79 наблюдений.

Сводный гранулометрический состав

FEPA 42-D 1984 Ряд F	Ориентировочное соотношение с ГОСТ 3647-80	Размер шлифзерна основной фракции, мм	Образец № 1	Образец № 2	Количество	Доля
–	–	>2,0	3	22	25	0,32
F-12	160	1,6–2,0	2	11	13	0,16
F-16	125	1,25–1,6	3	15	18	0,23
F-20	100	1,0–1,25	4	12	16	0,20
F-24	80	0,8–1,0	3	2	5	0,06
F-30	63	0,63–0,8	1	1	2	0,03
Итого			16	63	79	1,00

Как видно из таблицы, для исследуемых примеров преобладающим (более 50 %) является размер частиц от 1 до 2 мм, при этом наблюдается значительная доля (более 30 %) частиц с размерами более 2 мм. Необходимо отметить, что расчет гранулометрического состава в рамках предлагаемой методики определения линейных размеров частиц по фотоизображениям образцов носит приблизительный характер, так как не может учитывать частицы с общей площадью соизмеримой с площадью дефектов, тем не менее предложенный подход позволяет дать общее понимание максимальных размеров частиц и их процентного соотношения.

Заключение

Результаты исследований показывают достаточно высокую пригодность предложенной методики для оценки размеров частиц карбида кремния по фотоизображениям срезов образцов керамических изделий, что подтверждается соотношением полученных размеров шлифзерна с нормативными документами (ГОСТ 3647-80, FEPA 42-D 1984). Для исследуемых образцов медианное значение размеров частиц карбида кремния составило от 1 до 2 мм.

Для увеличения достоверности предложенного подхода необходимо автоматизировать определение пороговых значений маски яркости и фильтра шумов, а также провести валидацию разработанной методики на образцах керамики с известным гранулометрическим составом.

Литература

1. Шустерман, С. А. Автоматический анализ гранулометрического состава взорванной горной массы по фотографиям / С. А. Шустерман // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 4. – С. 67–73.
2. Молдован, Д. В. Анализ гранулометрического состава взорванной горной массы / Д. В. Молдован // Записки Горного института. – 2006. – Т. 167, Ч. 1. – С. 83–85.
3. Определение гранулометрического состава результата буровзрывных работ в карьере с применением нейронных сетей / О. Гордиенко, Д. А. Полещенко, И. С. Михайлов, В. Е. Климов // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 11. – С. 65–74.
4. Дремин, А. В. Групповая оценка гранулометрического состава осыпи буровзрывных работ / А. В. Дремин, Ю. В. Марков // Вестник науки. – 2023. – № 4 (61). – С. 276–281.
5. Материалы абразивные. Зернистость и зерновой состав шлифовальных порошков. Контроль зернового состава : ГОСТ Р 52381-2005 (ИСО 8486-1:1996, ИСО 6344-2:1998, ИСО 9138:1993, ИСО 9284:1992) ; введ. 01.07.2006. – М. : Стандартинформ, 2005. – 15 с.
6. Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля : ГОСТ 3647-80. – Взамен ГОСТ 3647-71 ; введ. 01.01.1982. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 28 с.
7. ОАО «Волжский абразивный завод». – М., 1961–2025. – URL: <https://vabz.ru/> (дата обращения: 10.10.2023).

References

1. Shusterman S. A. Automatic analysis of the granulometric composition of blasted rock mass from photographs. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* = *Mining informational and analytical bulletin*, 2007, no. 1, pp. 67–73 (in Russian).
2. Moldovan D. V. *Analysis of the granulometric composition of the blasted rock mass. Zapiski Gornogo instituta* = *Journal of Mining Institute*, 2006, vol. 167, ch. 1, pp. 83–85 (in Russian).
3. Gordienko O., Poleshchenko D. A., Mikhailov I. S., Klimov V. E. Determination of granulometric composition of the result of drilling and blasting operations in a quarry using

- neural networks. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering journal of Don*, 2023, no. 11, pp. 65–74 (in Russian).
4. Dremine A. V., Markov Yu. V. Group assessment of the granulometric composition of the drilling and blasting debris. *Vestnik nauki*, 2023, no. 4 (61), pp. 276–281 (in Russian).
 5. GOST R 52381-2005 (ISO 8486-1:1996, ISO 6344-2:1998, ISO 9138:1993, ISO 9284:1992). *Abrasive materials. Grain size and grain composition of grinding powders. Control of grain composition*. Moscow, Standartinform Publ., 2005, 15 p. (in Russian).
 6. GOST 3647-80 *Grinding materials. Classification. Granularity and grain composition. Methods of control*. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1997. 28 p. (in Russian).
 7. Volzhsky Abrasive Plant Open Joint-Stock Company. URL: <https://vabz.ru/> (accessed 10 October 2023) (in Russian).

Поступила 10.02.2025 г.