



# ПОНЯТИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА РУДНОЙ МАССЫ И ЕЁ РОЛЬ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**Зарина Нарзуллаева** <sup>1</sup>[0009-0004-9844-1601], **Бунёд Худойбердиев** <sup>2</sup>[0009-0008-0501-2912]

<sup>1</sup>Навоийский государственный университет, докторант кафедры «Цифровых технологий», E-mail: [zarinafarmonova@gmail.com](mailto:zarinafarmonova@gmail.com)

<sup>2</sup>Навоийский государственный университет горного дела и технологий, докторант кафедры «Автоматизация и управление», E-mail: [bunyodbek2545@gmail.com](mailto:bunyodbek2545@gmail.com)

**Аннотация.** Полезные ископаемые после добычи или дробления представляют собой смесь кусков или зерен разной крупности – от частиц микрона до сотен миллиметров. Соотношение массовых количеств зерен разной крупности, входящих в состав полезного ископаемого, называется гранулометрическим составом или гранулометрической характеристикой. Гранулометрический состав материала дает возможность определить нагрузку на обогатительные машины, эффективность работы грохотов, классификаторов и дробилок, необходимую степень измельчения для раскрытия зерен полезных минералов и т.д. Распределение частиц по размерам влияет на энергозатраты при дроблении и измельчении, степень раскрытия полезных минералов, устойчивость классификации, кинетику флотации и фильтрационные свойства штабелей при кучном выщелачивании. Определение гранулометрического состава состоит в разделении массы полезного ископаемого на классы, ограниченные верхним и нижним предельными размерами

**Ключевые слова:** гранулометрический состав, ситовой анализ, над решётный продукт, под решётный продукт, диаметр, дробление, измельчение, классификация, кучное выщелачивание, компьютерное зрение, глубокое обучение, сверточные нейронные сети.

**Annotatsiya.** Ekstraksiya yoki maydalashdan so'ng, minerallar mikron zarralaridan yuzlab millimetrgacha bo'lgan turli o'lchamdagi bo'laklar yoki donalarning aralashmasidir. Mineralni tashkil etuvchi turli o'lchamdagi donalarning massa miqdorining nisbati uning zarracha o'lchamlari taqsimoti yoki zarracha o'lchamining xarakteristikasi deb ataladi. Materialning zarracha o'lchamlari taqsimoti qayta ishlash mashinalariga yukni, ekranlar, klassifikatorlar va maydalagichlarning samaradorligini, foydali mineral donalarini chiqarish uchun zarur bo'lgan maydalash darajasini va boshqalarni aniqlashga yordam beradi. Zarracha o'lchamlari taqsimoti maydalash va maydalash paytida energiya sarfiga, foydali minerallarning ajralib chiqish darajasiga, tasniflash barqarorligiga, flotatsiya kinetikasiga va uyum bilan eritib yuborish qoziqlarining filtrlash xususiyatlariga ta'sir qiladi. Zarracha o'lchamlari taqsimotini aniqlash mineral massasini yuqori va pastki o'lcham chegaralari bilan belgilangan sinflarga bo'lishni o'z ichiga oladi.

**Kalit so'zlar:** zarracha o'lchamlari taqsimoti, elak tahlili, katta o'lchamdagi mahsulot, kichik o'lchamdagi mahsulot, diametr, maydalash, maydalash, tasniflash, uyum bilan eritib yuborish, kompyuter ko'rish, chuqur o'rganish, konvolyutsion neyron tarmoqlari.

**Abstract.** After extraction or crushing, minerals are a mixture of pieces or grains of varying sizes, from micron particles to hundreds of millimeters. The ratio of the mass quantities of grains of varying sizes that make up a mineral is called its particle size distribution or particle size characteristic. The particle size distribution of a material helps determine the load on processing machines, the efficiency of screens, classifiers, and crushers, the required degree of grinding to release useful mineral grains, etc. Particle size distribution affects energy consumption during crushing and grinding, the degree of useful mineral release, classification stability, flotation kinetics, and the filtration properties of heap leaching piles. Determining particle size distribution involves dividing a mineral mass into classes defined by upper and lower size limits.

**Keywords:** particle size distribution, sieve analysis, oversize product, undersize product, diameter, crushing, grinding, classification, heap leaching, computer vision, deep learning, convolutional neural networks.

## Введение

© International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences Vol.1(7), 2025 IF=4.372, ICV:59.77

Снижение среднего содержания полезных компонентов в рудах, рост глубины разработки месторождений и неуклонное повышение стоимости энергоресурсов диктуют жесткие требования к технологической эффективности горнодобывающих и перерабатывающих производств [1]. В этих условиях гранулометрический состав (грансостав) выступает не просто как физический показатель, а как критический параметр управления качеством рудной массы. Он определяет пропускную способность оборудования, селективность раскрытия минеральных комплексов и, как следствие, итоговый коэффициент извлечения металлов. В прикладном аспекте грансостав служит связующим звеном между «горным» переделом (БВР, погрузка, транспортировка) и «фабричным» этапом (дробление, измельчение, классификация), формируя фундамент сквозной оптимизации в рамках концепции «от рудника до обогатительной фабрики» [2].

Актуальность системного мониторинга грансостава многократно возрастает в эпоху глобальной цифровизации горной отрасли. Внедрение высокоразрешающих оптических сенсоров, мультиспектральных камер и беспилотных авиационных систем (БАС/БПЛА) позволяет трансформировать дискретный лабораторный контроль в системы непрерывного мониторинга в режиме реального времени. Современные вычислительные платформы, интегрированные с алгоритмами машинного зрения (Computer Vision) и глубокого обучения (Deep Learning), обеспечивают автоматизированную сегментацию изображений взорванной горной массы и высокоточную оценку распределения крупности кусков без остановки технологических процессов. Грансостав влияет на всю технологическую цепочку. При буровзрывных работах – показатель качества взрыва. Если куски слишком крупные («негабарит»), их придется дробить отдельно, что дорого. При транспортировке – слишком мелкая руда может пылить или налипать на ленты конвейеров, а слишком крупная — повредить кузов самосвала или забить бункер.

При обогащении: мельницы и дробилки рассчитаны на определенный входной размер. Нарушение состава ведет к поломкам или потере ценных металлов [5,6]. На рисунке 1 представлена концептуальная цепочка от шахты до завода.



Рис.1. Концептуальная цепочка от шахты до завода [7].

### Ключевые показатели грансостава

На практике за размер зерна принимают размер квадратного отверстия, через которое это зерно проваливается. Материал, прошедший через отверстие  $l_1$  и оставшийся на отверстии  $l_2$ , причем  $l_2 < l_1$ , называется классом крупности. Крупность класса обозначают следующим способом:  $-l_1+l_2$  (минус  $l_1$  плюс  $l_2$ ). Например, класс  $-250+100$  мм. Это значит, что размеры класса меньше, чем 250 мм, но больше, чем



100 мм. Характеристика массы зерен различного размера по крупности называется гранулометрической характеристикой [8,9].

Основные понятия:

- фракция (класс): группа кусков руды, размер которых ограничен определенным диапазоном (например, от 10 до 20 мм).

- выход фракции: количество конкретной фракции в процентах от общей массы пробы.

- грансостав: перечень всех фракций и их процентное содержание [10].

Например, гранулометрический состав измельченного материала [11] приведен в таблице

Таблица 1.

Гранулометрический состав измельченного материала

Класс крупности, мм	Выход класса, %
-5+3	11,85
-3+2	5,40
-2+1,6	8,41
-1,6+1,0	16,81
-1,0+0,5	17,01
-0,5+0,18	13,37
-0,18+0,1	3,87
-0,1+0,071	1,10
-0,071+0	22,19
<b>Итого</b>	<b>100,0</b>

В технологической практике наиболее распространены показатели  $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{80}$ ,  $d_{90}$  (или  $P_{10}$ ,  $P_{50}$ ,  $P_{80}$ ,  $P_{90}$ ), которые интерпретируются как размеры частиц, ниже которых находится соответствующая доля материала.

Показатель  $P_{80}$  широко используется при проектировании и управлении измельчением: он отражает «характерную» крупность продукта и коррелирует с удельными энергозатратами и степенью раскрытия. Однако ряд исследований подчеркивает, что одного  $P_{80}$  недостаточно: одинаковые значения  $P_{80}$  могут соответствовать различной ширине распределения, доле тонких классов и содержанию сверхкрупной фракции, что по-разному влияет на флотацию, классификацию и фильтрационные свойства при выщелачивании. Поэтому для корректного управления нередко используют совокупность метрик ( $P_{80}$  вместе с  $P_{20}/P_{50}/P_{90}$ , индексом однородности, долей  $-0,074$  мм и т.п.) [12,13].

### Классические методы определения гранулометрического состава

Существует три основных методов определения гранулометрического состава горных пород: ситовый анализ – руду просеивают через набор сит с разными отверстиями. Самый точный метод для мелких и средних классов; фотопланиметрия – современный метод. Специальное ПО анализирует фотографии или видеопоток руды на конвейере и вычисляет размеры кусков по картинке; глазомерная оценка – быстрый, но неточный метод, используемый опытными мастерами непосредственно в забое [14].

Базовым лабораторным методом определения грансостава для крупностей от десятков микрометров до сантиметров является ситовый анализ, стандартизированный международной практикой тестового просеивания. Ситовой



анализ обеспечивает сопоставимость результатов при условии соблюдения правил подготовки проб, режима просеивания, контроля влажности и предотвращения агломерации.

Разделение пробы на классы производится тщательным просеиванием сквозь набор сит с определенными размерами отверстий. Ситовый анализ применяется для исследования материалов крупностью от 150-200 мм до 0,074 (0,043) мм. Гранулометрический состав материала крупностью меньше 0,074 (0,043) мм обычно определяется по помощи седиментационного анализа. Для ситового анализа применяются контрольные сита из металлических или синтетических сеток с квадратными отверстиями. Набор сит для отсева руд включает сита с размерами отверстий 60; 40; 30; 20; 10; 5; 2,5; 1 мм; для отсева угля – 150; 100; 50; 25; 13; 6; 3; 1; 0,5 мм. Для отсева мелких материалов используют контрольные сита с размерами ячеек 1,6; 1,25; 0,8; 0,56; 0,4; 0,28; 0,2; 0,14; 0,1; 0,071; 0,045 мм, а для особенно точного анализа с размерами ячеек 0,071; 0,063; 0,56; 0,05; 0,045 мм [15].

Отечественный ситовый вибрационный анализатор немецкой фирмы Fritsch Вибрационный грохот ANALYSETTE 3 PRO (рис. 1) предназначен для отсева проб сыпучих материалов сухим и мокрым способами, а также для определения их гранулометрического состава с использованием стандартного набора сит.

Для тонкодисперсных материалов широко применяются методы лазерной дифракции и седиментационные подходы, позволяющие оценивать распределения в микронном диапазоне. Однако лабораторные методы обладают ограничениями: (I) трудоемкость и длительность; (II) необходимость репрезентативного отбора проб в условиях высокой пространственной неоднородности рудной массы; (III) невозможность непрерывного контроля; (IV) систематические ошибки из-за формы частиц (анизотропии), налипания и наличия глинистых составляющих. Эти ограничения стимулируют развитие оперативных методов, интегрированных в технологический процесс [16].

*Буровзрывные работы и формирование питания рудоподготовки.* Фрагментация взорванной горной массы определяет долю негабарита, производительность экскавации, устойчивость первичного дробления и суммарные энергозатраты в цепочке уменьшения крупности. Модели прогнозирования фрагментации (включая Kuz–Ram и последующие модификации) связывают параметры массива и взрыва с ожидаемой кривой распределения кусков и позволяют количественно оценивать влияние изменения сетки бурения, удельного расхода ВВ и геометрии заряда на грансостав.

*Дробление.* Для дробильных агрегатов грансостав питания определяет степень заполнения, вероятность перегрузки и износ рабочих органов. Повышенная доля крупной фракции приводит к росту циркуляции, снижению производительности и увеличению удельной энергии, тогда как чрезмерное измельчение на ранних стадиях может формировать избыток мелочи, усложняя грохочение и ухудшая качество классификации.

*Измельчение и раскрытие минералов.* Уровень раскрытия (liberation) тесно связан с грансоставом: недостаточная степень измельчения приводит к сохранению сростков и потере извлечения, тогда как переизмельчение формирует шламы, повышает расход реагентов и увеличивает потери в хвостах (в том числе из-за ухудшения кинетики флотации и роста энтропийности тонких частиц). Энергетическая связь между крупностью и измельчением описывается классическими теориями.

*Классификация.* Классифицирующие аппараты (грохоты, гидроциклоны) формируют требуемое грансостава питания обогащения. Для гидроциклонов ключевым параметром является граничная крупность разделения  $d_{50}$  (cut size) и

«острота» разделения, влияющие на циркуляционную нагрузку замкнутых контуров и устойчивость измельчения [17].

**Обогащение (флотация и гравитационные процессы).** Во флотации зависимость извлечения от крупности носит нелинейный характер: как правило, максимальные показатели достигаются в “промежуточной” зоне крупности, тогда как сверхтонкие фракции характеризуются низкой вероятностью столкновения/прилипания. При гравитационном обогащении: Разделение зависит от скорости движения частиц в среде (вода/воздух), которая прямо зависит от размера. Крупные и мелкие частицы ведут себя по-разному, что требует классификации по крупности. Выщелачивание. При чанном и кучном выщелачивании уменьшение крупности повышает удельную поверхность и ускоряет кинетику растворения. Однако избыток мелочи ухудшает проницаемость штабеля, вызывает каналирование потоков и снижает извлечение. На практике применяют агломерацию (окомкование) как технологический компромисс между реакционной способностью и фильтрационными свойствами [18].

Таблица 2.

**Влияние грансостава на основные переделы технологической цепочки**

Передел	Критические показатели грансостав	Типовой эффект отклонений	Управляющие воздействия
Буровые взрывные работы	P50/P80; доля негабарита	Рост негабарита → простои, вторичное дробление	Сетка бурения, заряд, ВВ, иницирование
Дробление	Доля +Dmax; ширина распределения	Перегрузка дробилок, падение производительности	Настройка щели, режимы, грохочение
Измельчение	P80; доля -0,074 мм	Недораскрытие или переизмельчение; рост энергии	Нагрузка, обороты, классификация
Классификация	d50; острота разделения	Рост циркуляции; нестабильность контура	Давление, плотность, геометрия циклона
Флотация	Узость грансостава; доля тонких	Энтраймент тонких; потери на крупных	Режим измельчения, реагенты, гидродинамика
Кучное выщелачивание	Доля мелочи; пористость	Падение проницаемости, каналирование	Агломерация, орошение, грануляция

Переход к цифровым методам определения грансостав связан с развитием камер, беспилотных платформ и вычислительных средств, позволяющих анализировать изображения кусковатого материала на отвалах, в штабелях и на конвейерных лентах. Классическая цифровая обработка изображений использует фильтрацию, пороговую сегментацию, выделение контуров и морфологические операции. Эти методы эффективны при хорошем контрасте и слабом перекрытии фрагментов, но теряют устойчивость в условиях теней, вариативного освещения, сложной текстуры и соприкосновения кусков. Глубокое обучение формирует новый стандарт автоматизации. Сегментационные нейросети (например, U-Net) обеспечивают пиксельную разметку областей, а модели instance-segmentation



(например, Mask R-CNN) позволяют разделять соприкасающиеся объекты, выделяя маску каждого отдельного фрагмента. После сегментации рассчитывают геометрические признаки (эквивалентный диаметр, диаметры Ферре, проекционная площадь, периметр), затем формируют грансостав и метрики P80/d50. Для физической интерпретации необходимы калибровка масштаба (объект-эталон, лазерная линейка, стереопара) и учет перспективных искажений.

Практически важна оценка неопределенности: для технологических решений требуется не только точечное значение P80, но и доверительный интервал.

Таблица 3.

## Сравнение подходов к определению гранулометрического состава

Метод	Диапазон крупности	Оперативность	Преимущества	Ограничения
Ситовой анализ	≈ 0,04–100 мм	Низкая (лаборатория)	Стандартизованность, сопоставимость	Отбор проб, время, трудоемкость
Лазерная дифракция	≈ 0,1–3000 мкм	Средняя	Высокая детализация тонких классов	Чувствительность к форме/агломерации
Классический ( <i>image processing</i> )	≈ 5–500 мм (условно)	Высокая	Дешево, быстро	Тени/перекрытия, слабая устойчивость
ИИ-сегментация (U-Net/Mask R-CNN)	≈ 5–500 мм (условно)	Высокая	Устойчивость к условиям, разделение объектов	Требуются датасеты, калибровка, переносимость
3D (стерео/LiDAR)	≈ 5–2000 мм	Средняя-высокая	Оценка объема, снижение 2D-ошибок	Стоимость, сложность интеграции

## Заключение

Найденная гранулометрическая характеристика позволяет: по виду кривой судить о преобладании крупных или мелких зерен. Суммарные характеристики «по плюс х» бывают выпуклыми, вогнутыми и прямолинейными. Выпуклая кривая получается при преобладании в материале крупных зерен, вогнутая – при преобладании мелких зерен. Прямолинейная кривая свидетельствует о равномерном распределении в материале зерен по крупности, т.е. на любом участке характеристики на единицу изменения диаметра приходится одинаковое изменение суммарного выхода материала; по кривой суммарной характеристики можно определить выход любого класса крупности; на основании гранулометрической характеристики можно вывести аналитические зависимости для определения удельной поверхности материала.

## Список использованной литературы:

[1]. Wills B.A., Finch J. Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 8th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2015. 512 p. DOI: 10.1016/C2010-0-65478-2.



- [2]. Theory of Comminution. Transactions of AIME, Mining Engineering. 1952. P. 484–494.
- [3]. Cunningham C.V.B. The Kuz-Ram Model for Prediction of Fragmentation from Blasting. In: Proceedings of the 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting (FRAGBLAST). 1983.
- [4]. Ouchterlony F. A review of development of better prediction equations for blast fragmentation. International Journal of Mining Science and Technology. 2019.
- [5]. Alderliesten M. Mean Particle Diameters, Part VII: The Rosin–Rammler Distribution // Particle & Particle Systems Characterization. – 2013. – Vol. 30. – №. 3. – P. 244–257. DOI: 10.1002/ppsc.201200021
- [6]. Zhang Z.X., Sanchidrián J.A., Ouchterlony F., Luukkanen S. Reduction of Fragment Size from Mining to Mineral Processing. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2023. DOI: 10.1007/s00603-022-03068-3.
- [7]. Salmi E.F. et al. A review of the methods to incorporate the geological and geomechanical characteristics into blast fragmentation. Engineering Geology. 2021. DOI: (см. изд.).
- [8]. Saldana M. et al. Applications of Kuz–Ram Models in Mine-to-Mill Integration and Optimization: A Review. Minerals. 2024. Vol. 14(11). DOI: (см. изд.).
- [9]. Ran J. et al. Effects of particle size on flotation performance in the separation of copper, gold and lead. Powder Technology. 2019. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.12.045.
- [10]. Zhang S. et al. Influence of particle size on flotation separation. Minerals. 2024. Vol. 14(10). DOI: (см. изд.).
- [11]. Kodali P., Depci T., Hawboldt K., Aitken M. Evaluation of stucco binder for agglomeration in the heap leaching of copper ore. Minerals Engineering. 2011. Vol. 24. P. 886–893. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.03.024.
- [12]. Chen K. et al. Agglomeration of fine-sized copper ore in heap leaching through geopolymerization process. Minerals Engineering. 2020. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106649.
- [13]. Toro, N., Jeldres, R. I., Danoucaras, M., Robles, L., & Salazar, K. (2021). Gangues and Clays Minerals as Rate-Limiting Factors in Heap Leaching. *Metals*, 11(10), 1539.
- [14]. Niedoba T. Mathematical models of hydrocyclone classification. E3S Web of Conferences. 2016.
- [15]. Jokovic V. et al. Can the performance of semi-inverted hydrocyclones be improved? Minerals Engineering. 2020.
- [16]. Nikolić V., Trumić M., Trumić M., Andrić L. A new approach to the calculation of Bond work index for finer samples // Minerals Engineering. – 2021. – Vol. 165. – Art. 106856. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106856.
- [17]. Saadoun A. et al. Fragmentation analysis using digital image processing and WipFrag. Journal of Mining Institute. 2022. DOI: (см. изд.).
- [18]. Palangio T.C., Franklin J.A., Maerz N.H. Case Studies using the WipFrag Image Analysis System // Proceedings of the 6th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting (FRAGBLAST-6). – Johannesburg, South Africa, 1999. – P. 117–122.
- [19]. Binel P. et al. A selective dissolution process featuring a classification step with a hydrocyclone. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2020. DOI: 10.1021/acs.iecr.0c04923.