

## СТАТЬИ

УДК 622.7:622.343

DOI 10.17513/use.38271

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ИЗМЕЛЬЧАЕМОСТЬ  
МЕДНО-МОЛИБДЕНОВЫХ РУД****Каллаев И.Т., Кухтина А.А., Кухтина П.А., Николаева Н.В.***ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-Петербург,**e-mail: kallaev1996@mail.ru, arisha362@mail.ru, pkuhtina@gmail.com, Nikolaeva\_nv@pers.spmi.ru*

Снижение качества минерального сырья, содержащего цветные металлы, привело к необходимости поиска способов интенсификации процессов рудоподготовки, обогащения и переработки. Одним из возможных способов интенсификации процессов рудоподготовки является использование ультразвукового воздействия. В работе изучено влияние использования ультразвука на измельчаемость медно-молибденовых руд. Исследования проводились на оборудовании Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II. Для изучения влияния ультразвука на измельчение комплексных медных руд с позиции увеличения выхода готового класса были проведены исследования по обработке исходных проб перед измельчением в течение различного времени. Результаты проведенных исследований показали, что при обработке ультразвуком происходит повышение температуры за счет выделения энергии, часть которой может быть использована для разрушения минеральных агрегатов. На основании проведенных экспериментально-теоретических исследований было сделано предположение, что на этапе обработки УЗ в минеральном сырье происходит понижение прочности сырья. Также проведенные исследования позволили установить положительный эффект ультразвукового воздействия при измельчении комплексного медного минерального сырья: использование ультразвуковой обработки перед измельчением позволило увеличить выход готового класса до 82,4%. Таким образом, использование ультразвукового воздействия позволит повысить эффективность процессов рудоподготовки при снижении энергетических затрат.

**Ключевые слова:** дезинтеграция, медно-молибденовые руды, измельчаемость, ультразвук, рудоподготовка

**IMPACT OF ULTRASOUND ON GRINDABILITY  
OF COPPER-MOLYBDENUM ORES****Kallaev I.T., Kukhtina A.A., Kukhtina P.A., Nikolaeva N.V.***Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg,**e-mail: kallaev1996@mail.ru, arisha362@mail.ru, pkuhtina@gmail.com, Nikolaeva\_nv@pers.spmi.ru*

Decrease in the quality of mineral raw materials containing non-ferrous metals has led to the need to search for ways to intensify the processes of ore preparation, beneficiation and processing. One of the possible ways of intensification of ore preparation processes is the use of ultrasonic influence. In this work we studied the effect of ultrasound on the grindability of copper-molybdenum ores. The research was carried out on the equipment of the St. Petersburg Mining University. To study the effect of ultrasound on the grinding of complex copper ores from the position of increasing the yield of the finished grade, studies were conducted on the treatment of initial samples before grinding for different times. The results of the conducted studies showed that ultrasonic treatment increases the temperature due to the release of energy, part of which can be used to destroy mineral aggregates. On the basis of the conducted experimental and theoretical studies it was made an assumption that at the stage of ultrasonic treatment in mineral raw materials there is a decrease in the strength of raw materials. Also the conducted researches have allowed to establish a positive effect of ultrasonic influence at grinding of complex copper mineral raw material: use of ultrasonic treatment before grinding has allowed to increase the yield of finished grade up to 82,4%. Thus, the use of ultrasonic impact allows to increase the efficiency of ore preparation processes with reduced energy costs.

**Keywords:** disintegration, copper-molybdenum ores, grindability, ultrasound, ore treatment

На цветные металлы (медь, алюминий, свинец, цинк, никель, титан, молибден и пр.) спрос постоянно растет, что связано с их уникальными физико-химическими и технологическими свойствами. Повышенная востребованность этих металлов привела к тому, что месторождения легко-обогатимых руд цветных металлов практически исчерпаны [1–3]. Для обеспечения потребности в этих металлах необходимо вовлекать в переработку низкокачественное, комплексное и нетрадиционное мине-

ральное сырье [4–6]. Особенности такого сырья, помимо низкого содержания ценных компонентов, является наличие нескольких ценных компонентов, основные минералы которых обладают близкими технологическими свойствами, тонкое взаимопрорастание рудных и породных минералов, а также наличие как сульфидных, так и окисленных минералов и др. [7–9]. При этом для достижения производительности по концентрату на существующем уровне необходимо увеличивать производительность по руде, что

приводит к необходимости модернизации и разработки новых, высокотехнологичных и экономически целесообразных технологий дезинтеграции, обогащения и переработки руд цветных металлов для получения товарных концентратов, чему посвящены работы многих ученых [10–12].

Для получения концентратов при обогащении руд цветных металлов используют традиционные методы: гравитационное, флотационное обогащение, гидрометаллургические методы [13–15]. Стоит отметить, что разработка проекта современной обогатительной фабрики должна соответствовать принципам рационального природопользования (малоотходное производство). Организация такого производства должна начинаться с процессов рудоподготовки, так как на этом этапе можно минимизировать потенциальные потери ценного компонента, вывести пустую породу за счет организации операций предконцентрации [16–18]. В соответствии с принципами рационального производства пустую породу можно использовать в будущем для закладки выработанного пространства при разработке месторождения или для производства строительного материала.

Основные задачи, стоящие перед процессами рудоподготовки, состоят в сокращении размера куска руды и раскрытии сростков при минимизации переошламования [19, 20]. Руды цветных металлов обладают различными прочностными свойствами, но технологии рудоподготовки при их переработке обычно включают трехстадиальное дробление + стадийное

измельчение (стержневое + шаровое измельчение); крупное дробление на карьере + полусамомоизмельчение (с/без додраблывания) + шаровое измельчение; дробление + полусамомоизмельчение + шаровое измельчение + сверхтонкое измельчение в бисерных мельницах [21, 22]. В таких схемах обогащения значителен выход тонкого класса, которые не подлежат обогащению и в некоторых случаях оказывает негативное влияние на протекание процессов переработки. Возникает закономерный вопрос: как разрушить кусок до определенной крупности при максимальном раскрытии сростков, но при этом не переизмельчить сырье? Одним из возможных вариантов решения этого вопроса является использование физических и химических воздействий на этапе измельчения (таблица).

Таким образом, проведенный анализ научных исследований показал, что использование физических и химических воздействий на этапе дробления и измельчения позволяет снизить прочность минерального сырья, повысить выход готового класса и подготовить сырье к последующему обогащению при снижении энергетических и финансовых затрат на этапе рудоподготовки, что соответствует Указу Президента Российской Федерации № 145 от 28.02.24 «О стратегии научно-технического развития Российской Федерации».

Целью исследования является установление закономерности разрушения и обоснование применения ультразвука при измельчении комплексных медных руд для повышения выхода готового класса.

Основные виды воздействий на стадии рудоподготовки

№ п/п	Вид воздействия	Достижимый эффект
1	СВЧ	Создание дополнительных дефектов и микротрещин в минеральном сырье [4, 23, 24]
2	Ультразвуковое	Использование эффекта кавитации для разрушения минеральных сростков [25, 26]
3	Электро-, магнитно- и электромагнитно-импульсные воздействия	Разрыв твердого куска на фрагменты вдоль ослабленных зон, преимущественно по границам сростания минералов [27, 28]
4	Гиперударные волны	Селективная дезинтеграция минеральных комплексов [29]
5	Поток ускоренных электронов	Повышение эффективности процессов первичной переработки за счет изменения физических, механических и физико-химических свойств минералов [30]
6	Добавка ПАВ	Адсорбционное понижение прочности минералов [31, 32]
7	Сверхнизкие температуры	Развитие гидратационных и криогидратационных процессов, происходящих как на поверхности, так и в объеме минерального сырья [4, 33, 34]

### Материалы и методы исследования

В работе были выбраны комплексные медные руды в качестве объекта исследования. Основными ценными компонентами являются  $\text{CuO}$  и  $\text{MoO}_3$ , содержание которых 0,622 и 0,116% соответственно. Исследования измельчаемости проводились на оборудовании Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II (щековая дробилка, валковая дробилка, шаровая мельница, ситовой анализатор «Laarmann»). Минералогические исследования проводились с помощью оптического поляризационного микроскопа класса Axio Imager A2m (Zeiss). Ультразвуковая обработка (УЗ) проводилась с использованием установки INLAB I100-6/1-1. Рабочая частота ультразвуковой установки изменяется от 22 до 44 кГц, что соответствует интенсивности воздействия от 5 до 25 Вт/см<sup>2</sup>. Предварительная подготовка материала к исследованиям заключалась в усреднении пробы и поэтапном сокращении крупности до 2 мм на щековой и валковой дробилке. Исходная масса навески во всех опытах составляла 100 г. Условия проведения исследований по измельчению: измельчение проводилось в сухом режиме, масса шаровой загрузки равна 2,94 кг, крупность готового класса – 0,071 мм.

Проведенными ранее исследованиями было установлено, что оптимальное время

измельчения равно 15 мин [35], что достаточно для подготовки питания флотации (70% класса – 0,071 мм). Обработка ультразвуком проводилась в воде при вариации времени обработки: 5, 30 и 60 мин. Фиксация изменения температуры осуществлялась мобильным тепловизором TR526i (рис. 1).

После обработки ультразвуком материал сушился при постоянной температуре 105°C для последующих экспериментов по измельчению. Для подтверждения полученных данных все эксперименты повторялись по три раза.

### Результаты исследования и их обсуждение

Для изучения влияния ультразвука на измельчение комплексных медных руд с позиции увеличения выхода готового класса были проведены исследования по обработке исходных проб перед измельчением в течение различного времени (5, 30 и 60 мин). Анализ проведенных исследований показал, что кавитация, вызванная ультразвуком, может оказывать дополнительное разрушающее воздействие на сродки, тем самым снижая затраты энергии на самой стадии измельчения.

При обработке УЗ фиксировалась температура, результаты этих исследований представлены на рис. 2.



Рис. 1. Общий вид проведения экспериментов по УЗ обработке

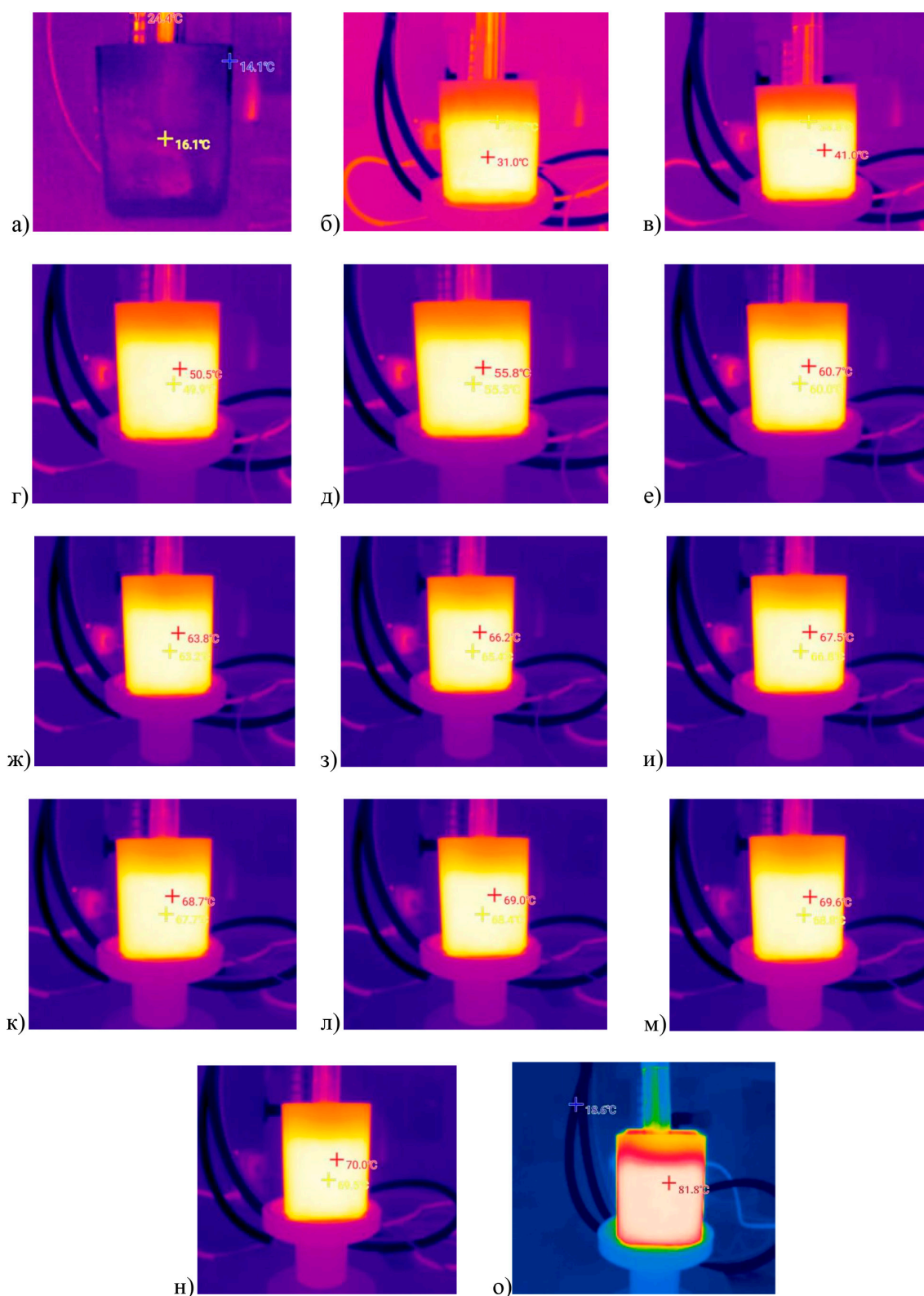


Рис. 2. Изменение температуры при увеличении времени обработки УЗ:  
 а – 0 мин, б – 5 мин, в – 10 мин, г – 15 мин, д – 20 мин, е – 25 мин, ж – 30 мин,  
 з – 35 мин, и – 40 мин, к – 45 мин, л – 50 мин, м – 55 мин, н – 60 мин, о – 60 мин  
 (вода без добавления образца)



Как видно на рис. 2, температура резко возрастает до 15 мин (с 16,1 до 50,5°C, затем идет постепенное незначительное увеличение значения температуры до 70,0°C). При этом также наблюдается, что при обработке минеральной суспензии часть энергии тратится не на нагрев, а на разрушение. На основании проведенных экспериментально-теоретических исследований было сделано предположение, что на этапе обработки УЗ в минеральном сырье происходит понижение прочности сырья и образование

различных дефектов, микротрещин и их зародышей. После обработки ультразвуком проба высушивалась при температуре 105°C и подвергалась измельчению в течение 15 мин. Результаты проведенных исследований представлены на рис. 3–6.

Как показал анализ результатов, представленных на рис. 3–6, при использовании ультразвуковой обработки перед измельчением выход готового класса увеличился с 70,3 до 82,4% при идентичных условиях измельчения.

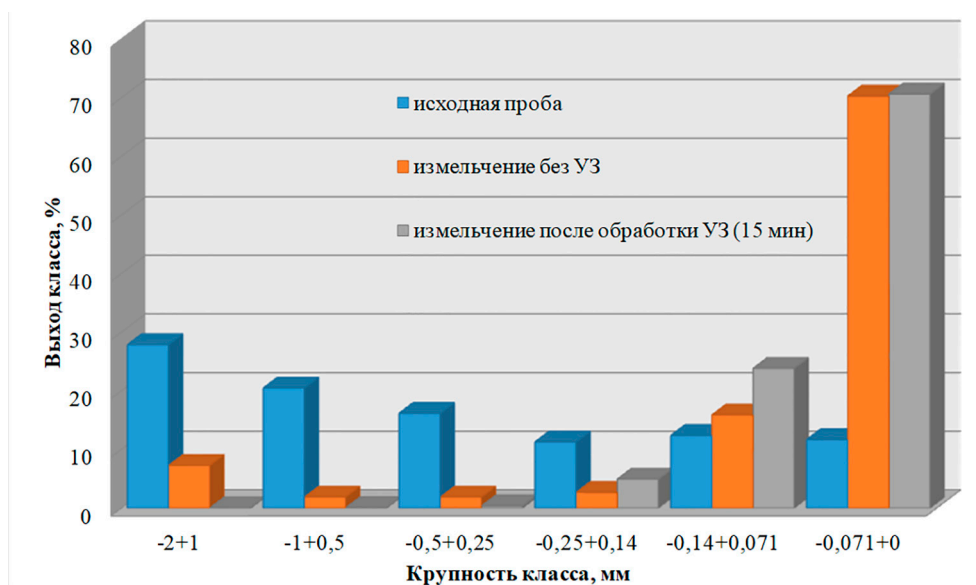


Рис. 3. Распределение по классам крупности до, после измельчения и после измельчения с предварительной обработкой УЗ (15 мин)

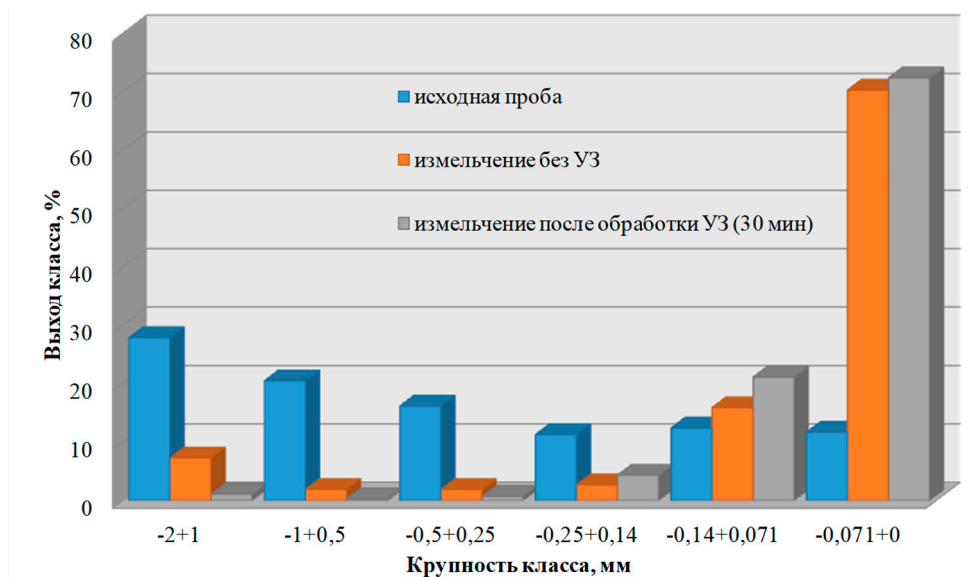


Рис. 4. Распределение по классам крупности до, после измельчения и после измельчения с предварительной обработкой УЗ (30 мин)

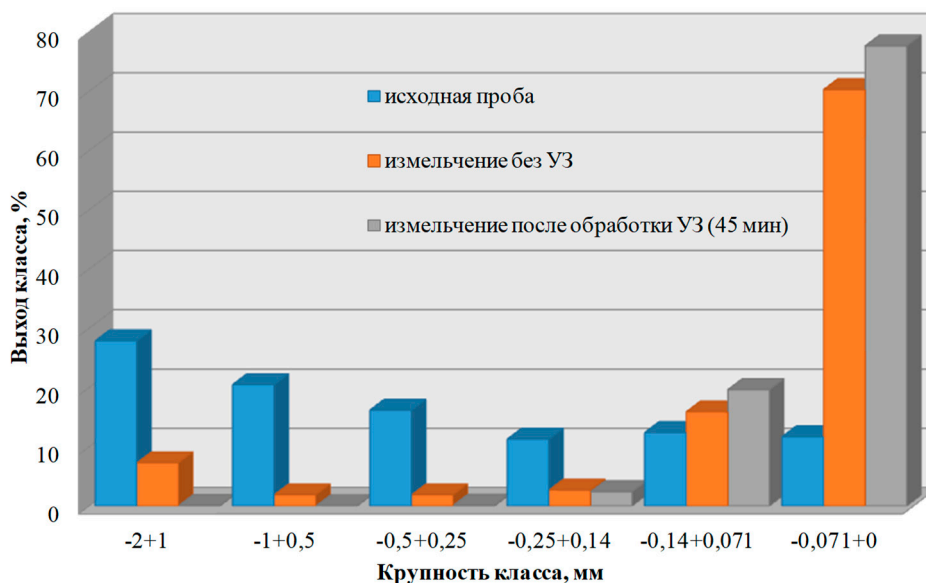


Рис. 5. Распределение по классам крупности до, после измельчения и после измельчения с предварительной обработкой УЗ (45 мин)

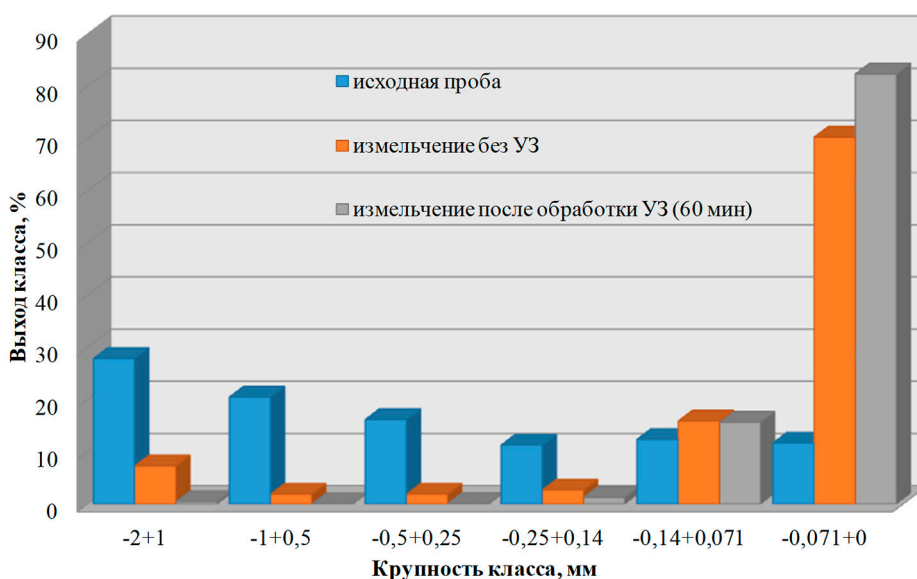


Рис. 6. Распределение по классам крупности до, после измельчения и после измельчения с предварительной обработкой УЗ (60 мин)

Проведенные исследования позволили установить положительный эффект ультразвукового воздействия при измельчении комплексного медного минерального сырья. Ультразвуковое воздействие в суспензиях вызывает образование кавитационных пузырьков, при схлопывании которых выделяется энергия. Часть этой энергии идет или на разрушение минеральных агрегатов, или на образование микротрещин, что ока-

зывает положительный эффект на разрушение минерального сырья на последующих стадиях измельчения.

#### Заключение

Снижение качества минерально-сырьевой базы цветных металлов. Результаты исследований свидетельствуют о том, что ультразвуковая обработка позволяет интенсифицировать процесс измельчения мине-

рального сырья с целью повышения выхода готового класса. Результаты проведенных исследований показали, что при обработке ультразвуком происходит повышение температуры за счет выделения энергии, часть которой может быть использована для разрушения минеральных агрегатов. Как показали результаты гранулометрического анализа, даже при минимальном времени ультразвуковой обработки (5 мин) наблюдается увеличение выхода готового класса, хоть и незначительное. При увеличении времени обработки до 60 мин выход готового класса увеличивается на 12,1 % по сравнению с режимом измельчения без обработки. Данные результаты позволяют предположить, что использование ультразвуковой обработки позволит сократить время пребывания материала мельницы (увеличить производительность мельницы по исходному питанию) при получении 70 % класса – 0,071 мм как питания последующей флотации. Таким образом, использование ультразвукового воздействия позволит повысить эффективность процессов рудоподготовки при снижении энергетических затрат.

#### Список литературы

- Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95–111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.
- Чантурия В.А. Научное обоснование и разработка инновационных процессов извлечения циркония и РЗЭ при глубокой и комплексной переработке эвдиалитового концентрата // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 505–516. DOI: 10.31897/PMI.2022.31.
- Paul A.J. Lusty, A.G. Gunn. Challenges to global mineral resource security and options for future supply // Geological Society London Special Publications. 2014. № 393 (1). P. 265–276. DOI: 10.1144/SP393.13.
- Aleksandrova T.N., Nikolaeva N.V., Afanasova A.V., Romashev A.O., Aburova V.A., Prokhorova E.O. Extraction of Low-Dimensional Structures of Noble and Rare Metals from Carbonaceous Ores Using Low-Temperature and Energy Impacts at Succeeding Stages of Raw Material Transformation // Minerals. 2023. Vol. 13. № 1. DOI: 10.3390/min13010084.
- Афанасова А.В., Абурова В.А. Укрупнение низкоразмерных благородных металлов из углеродистых материалов с применением микроволновой обработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 1. С. 20–35. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_1\_0\_20.
- Залесов М.В., Григорьева В.А., Трубилов В.С., Бодуэн А.Я. Разработка технических решений для повышения эффективности переработки высокомедистой золотосодержащей руды // Горная промышленность. 2021. № 5. С. 51–56. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-51-56.
- Yaghibi Moghaddam M., Ranjbar M., Manafi Z., Schaffie M., Jahani M. Modeling and Optimizing Bacterial Leaching Process Parameters to Increase Copper Extraction from a Low-Grade Ore. Miner. Eng. 2012. № 32. P. 5–7. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.03.008.
- Яковлева Т.А., Ромашев А.О., Машевский Г.Н. Оптимизация дозирования флотационных реагентов при флотации руд цветных металлов с применением цифровых технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6–2. С. 175–188. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_6\_2\_0\_175.
- Александрова Т.Н., О’Коннор С. Переработка платинометаллических руд в России и Южной Африке: состояние и перспективы // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 462–473. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.9.
- Чантурия В.А., Александрова Т.Н. Вклад ученых Российской академии наук в становление и развитие процессов обогащения и переработки минерального сырья. К 300-летию Российской академии наук // Цветные металлы. 2024. № 1. С. 6–16. DOI: 10.17580/tsm.2024.01.01.
- Афанасова А.В., Абурова В.А., Прохорова Е.О., Лушина Е.А. Исследование влияния депрессоров на флотоактивные породообразующие минералы при флотации сульфидных золотосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6–2. С. 161–174. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_161.
- Баранов В.Ф., Сатаев И.Ш. О мировой практике рудоподготовки медно-порфиновых руд // Обогащение руд. 2011. № 2. С. 3–9.
- Иваник С.А., Илюхин Д.А. Флотационное выделение элементарной серы из золотосодержащих кеков // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 202–208. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.202.
- Александрова Т.Н., Прохорова Е.О. Модификация свойств породообразующих минералов при флотации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 12. С. 123–138. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_12\_0\_123.
- Бодуэн А.Я., Фокина С.Б., Федоров А.Т., Петров Г.В. Совершенствование технологии сорбционного концентрирования платиновых металлов из хлоридных растворов гидрометаллургической переработки малосульфидных флотационных концентратов // Горный журнал. 2023. № 10. С. 34–40.
- Дурягина А.М., Таловина И.В., Либервирт Х., Илллова Р.К. Морфометрические параметры сульфидных руд как основа селективной рудоподготовки сырья // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 527–538. DOI: 10.31897/PMI.2022.76.
- Львов В.В., Читалов Л.С. Современные тенденции подходов к расчету рудоподготовительных процессов аппаратов для переработки руд цветных металлов // Цветные металлы. 2020. № 10. С. 20–26. DOI: 10.17580/tsm.2020.10.03.
- Ануфриев А.С., Лебедик Е.А., Бажин В.Ю. Новые подходы для повышения эффективности автоматизированных систем управления переделами рудоподготовки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 2. С. 76–92. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_2\_0\_76.
- Хопунов Э.А. Роль структуры и прочностных характеристик минералов в разрушении и раскрытии руд // Обогащение руд. 2011. № 1. С. 25–31.
- Adewuyi S.O., Ahmed H.A.M., Ahmed H.M.A. Methods of Ore Pretreatment for Comminution Energy Reduction // Minerals. 2020. Vol. 10, Is. 5. P. 1–23.
- Baranov V.F. Overview of operating practices of foreign concentrators processing sulfide and mixed copper ores // Obogashchenie Rud. 2020. No 3. P. 43–47.
- Gagnon C., Rosa A., Makni S., McIvor R. Replacement of Wet Ball Milling with High-Pressure Grinding Ahead of Mineral Separation // Mining, Metallurgy & Exploration. 2023. P. 1–8.
- Gholami H., Rezaei B., Mehdilo A., Hassanzadeh A., Yarahmadi M. Effect of microwave system location on floatability of chalcopyrite and pyrite in a copper ore processing circuit // Physicochem. Probl. Miner. Process. 2020. № 56 (3). P. 432–448. DOI: 10.37190/PPMP/118799.

24. Kingman S.W., Rowson N.A. Microwave treatment of minerals – A review // *Miner. Eng.* 1998. № 11 (11). P. 1081–1087. DOI: 10.1016/s0892-6875(98)00094-6.
25. Huang Z., Kuang J., Zhu L., Yuan W., Zou Z. Effect of ultrasonication on the separation kinetics of scheelite and calcite // *Miner. Eng.* 2021. № 163. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106762.
26. Cilek E.C., Ozgen S. Effect of ultrasound on separation selectivity and efficiency of flotation // *Miner. Eng.* 2009. № 22 (14). P. 1209–1217. DOI: 10.1016/j.mineng.2009.06.007.
27. Chanturiya V.A., Bunin I.Z. Advances in Pulsed Power Mineral Processing Technologies // *Minerals*. 2022. № 12 (9). P. 1177. DOI: 10.3390/min12091177.
28. Chanturiya V.A., Bunin I.Z., Ryazantseva M.V., Filippov L.O. Theory and Applications of High-Power Nanosecond Pulses to Processing of Mineral Complexes // *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.* 2011. № 32 (2). P. 105–136. DOI: 10.1080/08827508.2010.530722.
29. Lodeishchikov V.V. Some Possibilities for Processing of Refractory Gold Ores // *Zolotodobyvayushchaya promyshlennost'*. 2008. 64 p.
30. Gzogyan T.N. Intensification of Ore Dressing and Enrichment of Ferruginous Quartzite Based on Energy Impacts // *Min. In-formational Anal. Bull.* 2001. P. 41–53.
31. Литвинцев В.С., Мельникова Т.Н., Ятлукова Н.Г., Литвинова Н.М. Механоактивация в процессах рудоподготовки // *Горный журнал*. 2006. № 6. С. 95–96.
32. Мельникова Т.Н., Ятлукова Н.Г., Литвинова Н.М. К вопросу оптимизации процесса измельчения руд // *Обогащение руд*. 2006. № 4. С. 5–7.
33. Liu J., Wang H., Hu T., Bai X., Wang S., Xie W., Hao J., He Y. Recovery of  $\text{LiCoO}_2$  and Graphite from Spent Lithium-Ion Batteries by Cryogenic Grinding and Froth Flotation // *Miner. Eng.* 2020. P. 148. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106223.
34. Jaiswal S., Singh R., Singh V., Mukherjee A.K. A Study of the Effects of Thermal Shocks on Liberation Characteristics of High Coal Ash Particles // *Fuel*. 2018. № 233. P. 215–223. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.06.050.
35. Николаева Н.В., Каллаев И.Т. Особенности процесса измельчения медно-молибденовых руд // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024. № 1. С. 52–66. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_1\_0\_52.