

УДК: 622.736:534.6:669.21:532.135

doi 10.70769/3030-3214.SRT.3.4.2025.6

## ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗОЛОТА ИЗ РУДЫ



**Азимов Ойбек  
Ахмадович**

Доцент, Навоийский  
государственный горный и  
технологический университет,  
Навои, Узбекистан



**Саттарова Шахло  
Гайвилло кизи**

Докторант, Навоийский  
государственный горный и  
технологический университет,  
Навои, Узбекистан



**Нарзуллаев Жахонгир  
Норбобо угли**

Доцент, Навоийский  
государственный горный и  
технологический университет,  
Навои, Узбекистан



**Асроров Анвар  
Ахрорович**

Доцент, Навоийский  
государственный горный и  
технологический университет,  
Навои, Узбекистан

**Аннотация.** В статье рассматривается влияние предварительной ультразвуковой обработки (УЗО) на результаты гравитационного обогащения золотосодержащей руды в центробежном концентраторе. В качестве объекта исследования использовалась руда, характеризующаяся наличием тонковкрапленного золота в пирите и высоким содержанием иламующихся минералов. Обогащение проводилось на лабораторном концентраторе «Кнелсон» КС-МД3. Сравнительный анализ классической схемы и схемы с применением 5-минутной УЗО показал, что ультразвуковое воздействие не приводит к улучшению технологических показателей, а вызывает их стабильное снижение. Извлечение золота в объединенный концентрат снизилось с 27,62% до 25,53%, а содержание золота в нем упало с 9,22 г/т до 8,41 г/т. В работе выдвинута гипотеза о комплексных причинах такого влияния, связанных как с ухудшением реологии пульпы, так и с возможным переизмельчением хрупкого золотосодержащего пирита.

**Ключевые слова:** золото, центробежный концентратор, Кнелсон, гравитационное обогащение, ультразвуковая обработка, тонкое золото, пирит, реология, извлечение.

## DASTLABKI ULTRATOVUSHLI ISHLOV BERISHNING RUDADAN OLTINNING MARKAZDAN QOCHMA KONSENTRATSIYASI SAMARADORLIGIGA TA'SIRI

**Azimov Oybek  
Akhmadovich**

Navoiy davlat konchilik va  
texnologiyalar universiteti dotsenti,  
Navoiy, O'zbekiston

**Sattarova Shahlo  
G'ayvillo qizi**

Doktorant, Navoiy davlat konchilik  
va texnologiyalar universiteti,  
Navoiy, O'zbekiston

**Narzullayev Jahongir  
Norbobo o'g'li**

Navoiy davlat konchilik va  
texnologiyalar universiteti dotsenti,  
Navoiy, O'zbekiston

**Asrorov Anvar  
Axrorovich**

Navoiy davlat konchilik va  
texnologiyalar universiteti dotsenti,  
Navoiy, O'zbekiston

**Аннотация.** Мақоллада марказдан қочма бойитгичда оltin tarkibli rudani gravitatsion boyitish natijalariga dastlabki ultratovushli ishlov berishning ta'siri ko'rib chiqilgan. Tadqiqot obyekti sifatida pirit tarkibida mayda zarrachali oltin mavjudligi va shlamlanuvchi minerallarning yuqori miqdori bilan tavsiflanadigan ma'dandan foydalanilgan. Boyitish "Knelson" KC-MD3 laboratoriya konsentratorida olib borildi. Klassik sxema va 5 daqiqalik UTT qo'llanilgan sxemaning qiyosiy tahlili shuni ko'rsatdiki, ultratovush ta'siri texnologik ko'rsatkichlarning yaxshilanishiga olib kelmaydi, balki ularning barqaror

*pasayishiga sabab bo'ladi. Birlashtirilgan boyitmaga oltinni ajratib olish 27,62% dan 25,53% gacha, undagi oltin miqdori esa 9,22 g/t dan 8,41 g/t gacha kamaydi. Ishda bunday ta'sirning kompleks sabablari, pulpa reologiyasining yomonlashishi va mo'rt oltin tarkibli piritni qayta maydalash bilan bog'liq bo'lgan gipoteza ilgari surilgan.*

**Kalit so'zlar:** oltin, markazdan qochma konsentrator, Knelson, gravitatsion boyitish, ultratovush bilan ishlov berish, yupqa oltin, pirit, reologiya, ajratib olish.

## INFLUENCE OF PRELIMINARY ULTRASONIC TREATMENT ON THE EFFECTIVENESS OF CENTRIFUGAL GOLD CONCENTRATION FROM ORE

**Azimov Oybek  
Akhmadovich**

*Docent, Navoi State Mining and  
Technology University,  
Navoi, Uzbekistan*

**Sattarova Shahlo Gayvilo  
kizi**

*Doctoral student, Navoi State  
Mining and Technology University,  
Navoi, Uzbekistan*

**Narzullayev Jahongir  
Norbobo ugli**

*Docent, Navoi State Mining and  
Technology University,  
Navoi, Uzbekistan*

**Asrorov Anvar  
Ahrorovich**

*Docent, Navoi State Mining and  
Technology University,  
Navoi, Uzbekistan*

**Abstract.** *The article examines the influence of preliminary ultrasonic treatment (PWT) on the results of gravitational beneficiation of gold-bearing ore in a centrifugal concentrator. As an object of research, ore characterized by the presence of finely dispersed gold in pyrite and a high content of slimy minerals was used. Enrichment was carried out on the "Knelson" KC-MD3 laboratory concentrator. A comparative analysis of the classical circuit and the circuit using 5-minute ultrasound showed that ultrasonic exposure does not lead to improvement of technological indicators, but causes their stable decrease. The extraction of gold into the combined concentrate decreased from 27.62% to 25.53%, and the gold content in it decreased from 9.22 g/t to 8.41 g/t. The work proposes a hypothesis about the complex reasons for this influence, both related to the deterioration of pulp rheology and the possible overgrinding of fragile gold-containing pyrite.*

**Keywords:** *gold, centrifugal concentrator, Knelson, gravitational enrichment, ultrasonic treatment, fine gold, pyrite, rheology, extraction.*

**Введение.** Извлечение тонкого (<50 мкм) и мелкого золота является одной из ключевых задач современной золотодобычи. Потери этого золота при использовании традиционных гравитационных аппаратов, работающих в поле силы тяжести, могут достигать 50% и более [1, с. 188]. Прорыв в этой области был достигнут с разработкой и внедрением центробежных концентраторов (сепараторов), таких как Knelson, Falcon и др. В этих аппаратах пульпа разделяется в поле центробежных сил, в десятки и сотни раз превышающих силу тяжести. Это позволяет создавать условия для эффективного улавливания даже очень мелких и тонких частиц с высокой плотностью, которые в обычных условиях уносятся потоком воды.

Несмотря на высокую эффективность, работа центробежных сепараторов также чувствительна к свойствам питающей пульпы.

Ключевым условием для успешной сепарации является способность тяжелых частиц быстро мигрировать через слой пульпы и закрепляться в улавливающих канавках (рифлях) вращающегося ротора. Этот процесс поддерживается подачей под давлением оживающей воды, которая создает восходящий поток и поддерживает постель в псевдооживленном состоянии.

Любые факторы, препятствующие этому процессу, снижают извлечение. Как и в случае с концентрационными столами, наличие шламовых покрытий на частицах золота и сульфидов, а также высокая вязкость пульпы являются основными негативными факторами. Поэтому применение ультразвуковой обработки (УЗО) перед центробежной концентрацией теоретически выглядит весьма перспективно. Ожидается, что кавитационные процессы

очистят поверхность ценных минералов и дезагрегируют сгустки, подготавливая «идеальную» пульпу для разделения в поле высоких перегрузок [2, с. 83].

Однако, как отмечается в [5], влияние реологии пульпы на центробежную сепарацию имеет свою специфику. Повышенная вязкость не только замедляет осаждение тяжелых частиц, но и нарушает режим псевдооживления, "забивая" постель и препятствуя вытеснению из нее легких минералов. Кроме того, существует риск переизмельчения хрупких сульфидов под действием УЗО, что может привести к образованию ультратонких частиц, не улавливаемых даже в центробежном поле.

**Целью данной работы** является изучение влияния пятиминутной ультразвуковой обработки на показатели обогащения золото-содержащей руды в лабораторном центробежном концентраторе КС-МДЗ «Кнелсон».

**Материалы и методика эксперимента.**

**Характеристика пробы.** В качестве исходного сырья использовалась проба упорная золотосодержащая руда (-2 мм). Минеральный состав характеризуется преобладанием кварца и мусковита, золото ассоциировано с пиритом (1,3%).

Таблица 1.

**Минералогический состав упорной золотосодержащей руды**

Минерал	Кварц	Анкерит	Мусковит	Альбит	ТiO <sub>2</sub>	Пирит	Хлорит 2b	Анортит	Сидерит	Каолинит
Содержание, %	47,3	3,3	35,4	3,5	0,2	1,4	2,4	0,9	2,4	2,6

Как видно из таблицы 1. образец содержит преимущественно пирит как золотосодержащий минерал.

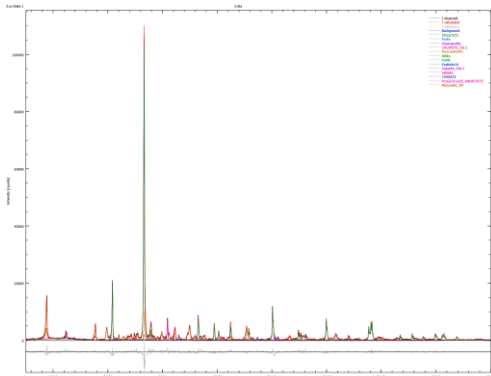


Рис.1. Порошковая дифрактограмма образца.

Данные порошковой рентгеновской дифрактометрии (Рис. 2.1) показали следующий минеральный состав, %: кварц - 46,3; мусковит - 36,4; альбит - 2,5; анкерит - 3,8; каолинит - 2,9; сидерит - 2,6; хлорит 2b - 2,4; пирит - 1,3; анортит - 0,9 и TiO<sub>2</sub> - 0,33.

**Проведение эксперимента.** Проба руды массой 10 кг была измельчена в стержневой мельнице в течение 54 минут с 6 литрами воды. Более длительное время измельчения по сравнению с опытами для стола (44 мин) было выбрано для лучшего раскрытия тонковкрапленного золота, что является стандартной практикой при подготовке питания для центробежных концентраторов. Полученная пульпа была гомогенизирована и разделена на две идентичные части.

**1. Контрольный опыт (классическая схема):** Первая часть пульпы была направлена на обогащение в центробежный концентратор КС-МДЗ. Процесс проводился в четыре последовательные стадии: пульпа подавалась в концентратор, отбирался концентрат 1, оставшиеся хвосты снова подавались в аппарат, отбирался концентрат 2, и так далее до получения 4 концентратов и конечных хвостов.

**2. Основной опыт (с УЗО):** Вторая часть пульпы перед обогащением была обработана ультразвуком в течение 5 минут, после чего процесс обогащения полностью повторял контрольный опыт.

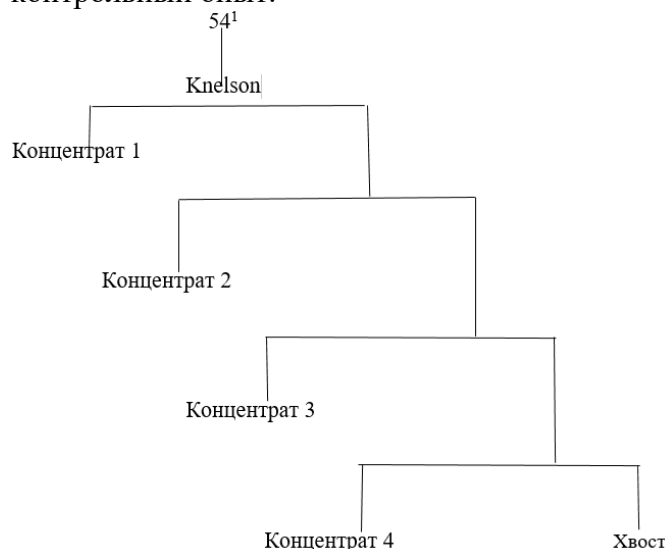


Рис.2. Схема обогащения золотосодержащую руду в центробежном концентраторе.

Режим работы концентратора КС-MD3 был постоянным для обоих опытов: частота вращения ротора – 90 об/мин, расход ожигающей воды – 3 л/мин. Все полученные продукты были высушены, взвешены и проанализированы на содержание золота. На основе полученных данных были рассчитаны показатели для объединенного концентрата (сумма продуктов стадий 1-4).

**Результаты и их обсуждение.** Сводные итоговые показатели, рассчитанные для объединенного концентрата, представлены в таблице 2.

Таблица 2.

**Результаты обогащения упорной золотосодержащей руды в центробежном концентраторе**

Показатель	Без УЗО	С УЗО (5 мин)
Выход объединённого концентрата, %	5,22	5,18
Содержание Au в концентрате, г/т	9,22	8,41
Извлечение Au в концентрат, %	27,62	25,53

Результаты показывают, что предварительная УЗО не дала положительного эффекта при обогащении в центробежном концентраторе. Было зафиксировано стабильное снижение всех ключевых показателей: содержание золота в объединенном концентрате уменьшилось на 8,8%, а извлечение снизилось на 2,09%.

Однако стоит отметить, что степень негативного влияния УЗО здесь выражена слабо. Мы связываем это с тем, что высокие перегрузки в центробежном поле способны частично компенсировать негативное влияние повышенной вязкости пульпы, «продавливая» тяжелые частицы к стенке ротора. Тем не менее, полного нивелирования негативного эффекта не происходит.

Можно выделить две вероятные и взаимодополняющие причины такого результата:

**1. Ухудшение реологических свойств пульпы:** Эта причина аналогична той, что была описана для концентрационного стола. Повышение вязкости пульпы из-за диспергирования глин и слюд нарушает работу концентратора. Оно не только замедляет осаждение частиц пирита, но и препятствует нормальной работе системы псевдооживления.

Вязкая пульпа «глушит» восходящий поток воды в рифлях, постель уплотняется и перестает эффективно обмениваться частицами с проходящим потоком, что снижает и извлечение, и качество концентрата.

**2. Переизмельчение ценного минерала:** Пирит, являясь хрупким сульфидом, может подвергаться разрушению под действием кавитации, особенно по микротрещинам. Учитывая, что золото в руде ассоциировано именно с пиритом, его переизмельчение приводит к образованию ультратонких (<10-15 мкм) золотосодержащих частиц. Такие частицы имеют огромное поверхностное трение по отношению к своей массе и могут уноситься потоком воды даже из поля высоких центробежных сил, что ведет к прямым потерям золота.

Вероятно, оба этих механизма действуют одновременно, обуславливая наблюдаемое снижение технологических показателей.

**Заключение и перспективы:**

1. Экспериментально установлено, что пятиминутная ультразвуковая обработка пульпы золотосодержащей руды перед центробежной концентрацией в аппарате «Кнелсон» не является эффективной мерой интенсификации и приводит к стабильному снижению показателей обогащения.

2. Снижение извлечения золота (с 27,62% до 25,53%) и качества концентрата (с 9,22 г/т до 8,41 г/т), вероятно, является следствием комплексного влияния УЗО: ухудшения реологических свойств пульпы из-за диспергации глин и возможного переизмельчения хрупкого золотосодержащего пирита.

3. Результаты подчеркивают критическую важность учета минералогического состава руды и физико-механических свойств минералов при выборе методов интенсификации. Для руд с высоким содержанием шламуемых минералов и хрупких сульфидов применение УЗО требует крайне осторожного подхода.

4. Для дальнейших исследований целесообразно изучить возможность применения УЗО в более «мягких» режимах (меньшая мощность, время) и рассмотреть ее применение не до, а между стадиями центробежной концентрации для обработки промежуточных

продуктов.

|

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

- [1] Петров, В. И. (2018). Основы обогащения полезных ископаемых. Москва: Недра.
- [2] Сидоров, А. П., & Козлов, Е. Н. (2020). Применение ультразвука для интенсификации процессов флотации и гравитации. Горный журнал, (5), 80–85.
- [3] Zhang, F., & Liu, G. (2019). Enhancement of gold recovery from quartz ores by ultrasonic pre-treatment. Minerals Engineering, 138, 112–118.
- [4] Kuznetsov, V. D., & Ivanov, S. M. (2021). The influence of pulp rheology on gravity separation of complex ores. International Journal of Mineral Processing, 195, 106321.
- [5] Laplante, A. R., & Gray, S. (2018). The effect of viscosity on the performance of centrifugal concentrators. In Proceedings of the XXIX International Mineral Processing Congress. Moscow.