



СТАТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИЗВЛЕЧЕНИЮ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ОКИСЛЕННЫХ МЕДНЫХ РУД

Холикулов Д.Б. 1[0000-0001-6968-9297], **Ниязметов Б.Е.** 2[0009-0003-0672-7200],
Мовланов А.С. 3[0009-0009-6141-6943], **Элчиева М.Д.** 4[0009-0001-4734-0278]

¹Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического университета,
заместитель директора по научной работе и инновациям, д.т.н., профессор,
E-mail: doniyor_xb@mail.ru

²АО «Алмалыкский ГМК», ведущий инженер Учебного центра,
E-mail: b.niyazmetov@agmk.uz

³Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического университета,
доцент кафедры «Металлургия», к.т.н.,
E-mail: doniyor_xb@mail.ru

⁴Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического университета,
базовый докторант кафедры «Металлургия»

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос о взаимосвязи извлечения золота и меди в лабораторных условиях при гравитационном обогащении с применением концентратора Knelson MD3. Нахождение функциональной зависимости на основе статистического анализа служит основой дальнейшего применения процесса в производстве. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации технологических режимов обогащения рудного сырья в промышленных масштабах.

Ключевые слова: окисленная медная руда, концентратор Knelson MD3, статистическая обработка, дисперсия, стандартное отклонение, коэффициент вариации, коэффициент Стьюдента.

Abstract. This paper examines the relationship between gold and laboratory environments during gravity concentration using a Knelson MD3 concentrator. Determining a functional relationship based on statistical analysis serves as the basis for further application of these processes in production. The results obtained can be used to optimize industrial-scale ore stream concentration processes.

Keywords: oxidized copper ore, Knelson MD3 concentrator, statistical analysis, dispersion, standard deviation, variation coefficient, Student's t-test.

Abstrakt. Ushbu maqola Knelson MD3 kontsentratörini kúllab tajkribá sharoitiда гравитация усулида бойитишида oltin va misni aşkratib olishni ýazar munosabatni kúrib чиқилган. Statistik tahlil asosida funksional bog'liqlikni aniqlash ushbu jarayonlarni ishlab chiqarishda qo'llash uchun asos bo'lib xizmat qiladi. Olingan natijalar sanoat miyosidagi ruda хомашёсини бойитиш технологик мөйёрларини optimallashtirish uchun кўлланishi mumkin.

Kalit so'zlar: oksidlangan mis rudasi, Knelson MD3 концентратори, statistik tahlil, dispersiya, standart og'ish, variatsiya koeffitsienti, Student koeffitsienti.

Введение

Современная практика гравитационного обогащения золотосодержащих руд демонстрирует значительный прогресс. Ключевым моментом является разработка и создание новых аппаратов и устройств, предназначенных для извлечения крупных и мельчайших частиц металлического золота [1-2]. Примером служат концентраторы и отсадочные машины, которые способствует более полному извлечению ценного компонента [3-4].

Первостепенная задача гравитационного метода обогащения заключается в извлечении крупного свободного золота из рудной массы. Полученные концентраты направляются на дальнейшую переработку в рамках специализированного металлургического процесса, отделенного от основной массы руды.



Проба окисленной медной руды месторождений Кальмакир имеет сложный комплекс соединений меди: хризоколла, псевдомалахит, либетенит, бирюза, элит, медистые галлуазиты, смеси каолинита с хризоколлой. На обогатимость руд влияет эти вмещающие породы [5-7]. Химический состав окисленной руды месторождения «Кальмакыр» на 85 % представлен литофильными компонентами [8-10]. Содержание кремнезема - 65,14 %, глинозема - 11,44 %, количество щелочных и щелочноземельных металлов - 4,25 %, двуокиси углерода - 0,44 % [11-16].

Использование гравитационного разделения золота в центробежном поле представляет собой многообещающий подход к обогащению комплексных медьсодержащих руд [17-18]. В связи со значительным присутствием окисленных медных минералов, научные исследования [19-23] склоняются к рассмотрению гидрометаллургических способов.

Основная часть

В лабораторных условиях были проведены эксперименты по гравитационному обогащению окисленных медных руд с использованием концентратора Knelson MD3, варьируя технологические параметры. С целью оптимизации расхода воды для флюидизации, на основе анализа содержания ценного компонента в продуктах обогащения, были проведены опыты при следующих условиях: расход воды флюидизации изменялся в диапазоне от 1 до 5 l/min, скорость вращения ротора была зафиксирована на уровне 1200 rpm, а продолжительность каждого эксперимента составляла 3 min.

Оптимальные результаты были достигнуты при расходе воды, равном 3 l/min. Вода, подаваемая для флюидизации, формирует псевдоожиженный слой в чаше концентратора. Недостаточный расход воды приводит к неполному вымыванию легких минералов и, как следствие, к повышенному захвату пустой породы концентратором.

На основе полученных данных был выполнен статистический анализ (табл. 1). Оптимальные показатели были зафиксированы при следующих условиях: расход воды для флюидизации варьировался в диапазоне от 2,5 до 3,0 l/min, скорость вращения ротора равнялась половине от максимальной (50%), а соотношение твердой фазы к жидкой – 1:3. При этих оптимальных условиях, выход готового класса составил 7,8%. Вместе с тем, степень извлечения золота достигла отметки в 52,2%, а меди – 12,45%.

Сбор статистических данных – это методичный, научно обоснованный и систематизированный процесс получения числовых данных об объектах и производственных процессах путем регистрации их ключевых характеристик. На данном этапе происходит формирование статистической информации, которая в дальнейшем подвергается систематизации, анализу и интеграции. Данное исследование посвящено анализу показателей гравитационного обогащения с использованием концентратора Knelson MD3 на основе статистической обработки собранных данных.

При анализе и обработке большое значение имеет установление рамок интервала. Интервалы, в случае если признак группировки характеризуется плавным изменением, могут быть одинаковыми или разными.

В данной работе демонстрируется опыт использования равных интервалов. При установлении числа групп и границ интервалов, необходимо учитывать качественные переходы, стоящие за количественными значениями, и избегать



объединения существенно разных единиц наблюдения в одну категорию. В технической практике чаще всего используются интервалы одинаковой величины.

Таблица 1.

Результаты исследований, проведенных на центробежном концентраторе Knelson MD3

№ опыта	Извлечение, %		Отклонение от среднего			
	Au	Cu	Au _{абс.}	Au _{квадр.}	Cu _{абс.}	Cu _{квадр.}
1	55,1	7,96	-2,888	8,3377	4,48917	20,15262
2	51,5	16,36	0,7125	0,5077	-3,9108	15,29462
3	52,2	9,42	0,0125	0,0002	3,02917	9,175851
4	52,2	12,45	0,0125	0,0002	-0,0008	6,94E-07
5	53,1	7,33	-0,888	0,7877	5,11917	26,20587
6	51,4	12,9	0,8125	0,6602	-0,4508	0,203251
7	51,7	13,23	0,5125	0,2627	-0,7808	0,609701
8	53,6	19,6	-1,388	1,9252	-7,1508	51,13442
9	54,1	11,1	-1,888	3,5627	1,34917	1,820251
10	51,7	16,1	0,5125	0,2627	-3,6508	13,32858
11	52,1	15,68	0,1125	0,0127	-3,2308	10,43828
12	50,6	7,61	1,6125	2,6002	4,83917	23,41753
13	53,5	16,17	-1,288	1,6577	-3,7208	13,8446
14	53,9	15,18	-1,688	2,8477	-2,7308	7,457451
15	51,7	7,61	0,5125	0,2627	4,83917	23,41753
16	52,8	8,12	-0,587	0,3452	4,32917	18,74168
17	51,5	8,16	0,7125	0,5077	4,28917	18,39695
18	51,5	12,7	0,7125	0,5077	-0,2508	0,062917
19	50,6	14,5	1,6125	2,6002	-2,0508	4,205917
20	51,9	13,4	0,3125	0,0977	-0,9508	0,904084
21	51,6	13,0	0,6125	0,37516	-0,55083	0,3034174
22	51,6	12,6	0,6125	0,37516	-0,15083	0,0227507
23	51,8	12,9	0,4125	0,17016	-0,45083	0,2032507
24	51,4	14,7	0,8125	0,66016	-2,25083	5,0662507

Анализ данных, полученных в ходе гравитационного обогащения на концентраторе Knelson MD3 (рис. 1-2), выявил значительную вариативность результатов в отдельных экспериментах. Одной из задач настоящего исследования является определение математической зависимости между переменными, характеризующими процесс обогащения. Для минимизации влияния резких колебаний в данных используется метод циклического сглаживания по трем точкам, который применяется двукратно. Анализируя результаты сглаживания, можно заключить, что процесс извлечения золота соответствует законам нормального распределения, в то время как для меди такое соответствие не наблюдается.

Установление пределов для диапазонов в статистических группировках строится на предположении, изменение количественного признака влечет за собой возникновение нового качественного состояния. В этом случае граница интервала определяется в точке, где наблюдается смена качества.

Существует метод определения количества групп, базирующийся на использовании среднеквадратического отклонения. Вариативность измеряется дисперсией, а квадратный корень из дисперсии представляет собой среднеквадратическое отклонение. В ряде источников данный показатель также известен как стандартное отклонение и рассчитывается по определенной формуле:



$$\begin{cases} \sigma_{Au} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_{i\text{Au}} - \bar{x}_{\text{Au}})^2}{2}} = 1.217 \\ \sigma_{Cu} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_{i\text{Cu}} - \bar{x}_{\text{Cu}})^2}{2}} = 8.41 \end{cases} \quad (1)$$

где, \bar{x} - среднее значение признака по совокупности, которое вычисляется по формуле:

$$\begin{cases} \bar{x}_{\text{Cu}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 95.6675 \\ \bar{x}_{\text{Mo}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 48.8275 \end{cases} \quad (2)$$

где, i -е значение варьирующего признака.

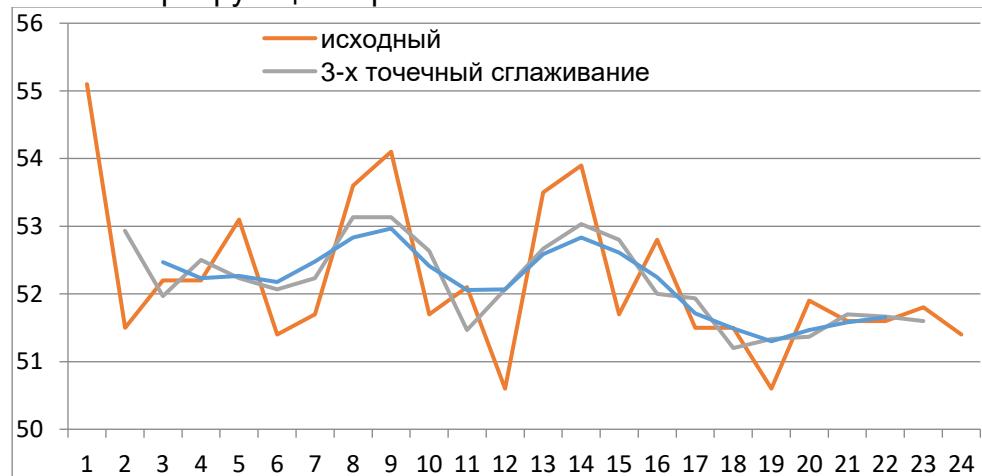


Рис. 1. Результаты математической зависимости между параметрами опыта извлечения Au из окисленных медных руд

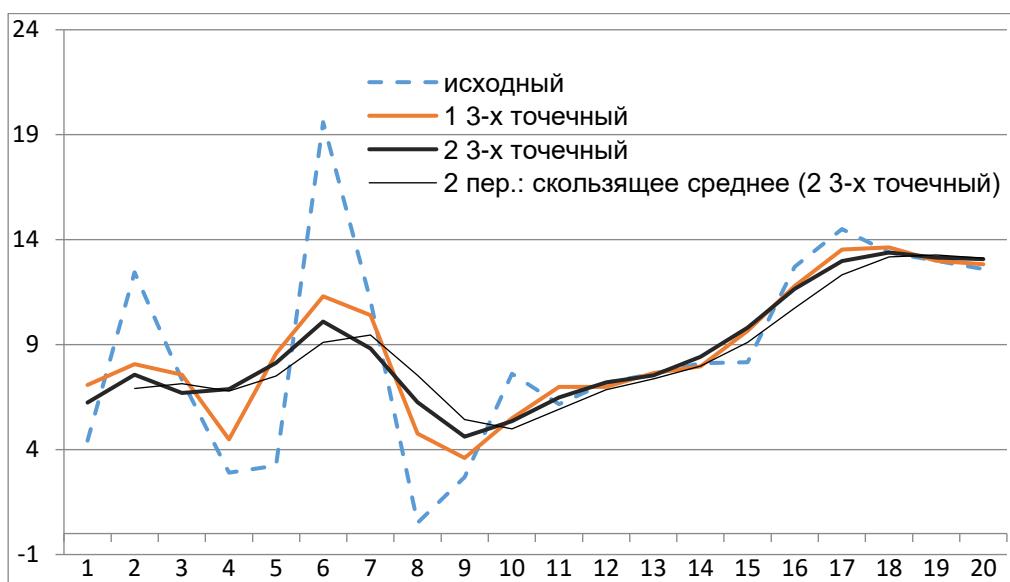


Рис. 2. Результаты математической зависимости между параметрами опыта извлечения Cu из окисленных медных руд.

Числовой результат, полученный по расчетам (1), указывает на допустимые производственные отклонения: для золота (Au) не более ± 1.2751 , а для меди (Cu) – 11,496. Оценка отклонений для молибдена (Mo) легко производится методом



сглаживания и составляет 8,41. После применения метода сглаживания, средние значения отклонений равны 1,12920 для золота и 3,3906 для меди (табл. 2).

Таблица 2.

Результаты дисперсионного анализа величины извлечения золота и меди при гравитационном обогащении на концентраторе Knelson MD3

Показатели	Извлечение металла, μ			Дисперсия σ^2	Стандартное отклонение σ	Коэффициенты Стьюдента, t_a						Коэффициент вариации, v
	max	min	среднее			0,9	0,95	0,98	0,99	0,998	0,999	
Извлечение Au	55,1	50,6	52,2125	1,2275	1,1292	1,71	2,06	2,49	2,8	3,74	3,74	2,1627
Извлечение Cu	19,6	7,33	12,4492	11,496	3,3906	1,714	2,07	2,5	2,81	3,77		5,94

Для статистической обработки экспериментальных данных были вычислены ключевые числовые характеристики.

- среднеарифметическое значение параметров [24-26]:

$$\mu = \bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (3)$$

- отклонение отдельных измерений:

$$\Delta a = \bar{a} - a_i \quad (4)$$

- дисперсия:

$$D_a = \sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2 \quad (5)$$

- среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{D_a} \quad (6)$$

- коэффициент вариации:

$$v = \frac{\sigma \times 100\%}{\mu} \quad (7)$$

Для оценки статистической значимости расхождений между средними значениями чаще всего прибегают к t-критерию Стьюдента. Его применение обычно охватывает как сопоставление независимых групп, так и анализ связанных выборок. Обязательным условием для использования t-критерия Стьюдента является нормальное распределение исходных данных.

При использовании двухвыборочного варианта для несвязанных групп также необходимо удостовериться в равенстве дисперсий. Если данное условие не выполняется, то при сравнении выборочных средних следует обращаться к альтернативным методам непараметрической статистики. Наиболее распространенными среди них являются U-критерий Манна-Уитни, критерий знаков и критерий Вилкоксона. Необходимо правильно интерпретировать вычисленное значение t-статистики Стьюдента. Для этого требуется информация о количестве в каждой из анализируемых групп (n_1 и n_2). Далее, определяем критическое значение t-критерия Стьюдента для выбранного уровня значимости (например, $p=0,05$) и при данном числе степеней свободы (df) (по табл.2) сравниваем критическое и рассчитанное значения критерия:



Если эмпирическое значение t -критерия Стьюдента превышает или равно критическому значению, определенному по таблице, это свидетельствует о статистически значимых различиях между анализируемыми параметрами.

Если эмпирическое значение t -критерия Стьюдента меньше табличного, это указывает на отсутствие статистически значимых различий между сравниваемыми параметрами.

При гравитационном обогащении окисленных медных руд на концентраторе Knelson MD3 коэффициент вариации извлечения Au равен 1.15, а коэффициент вариации извлечения Ag составляет 5.94 [24-26].

Заключение

Таким образом, полученные значения коэффициентов вариации указывают на воспроизводимость полученных результатов с достаточной степенью достоверности и надежности.

Список использованной литературы:

- [1]. Жанатов Н. Д., Барменшинова М. Б. Оценка эффективности гравитационного обогащения упорной золотосодержащей руды месторождения Актобе // Вестник науки. 2025. №4 (85). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-gravitatsionnogo-obogashcheniya-upornoj-zolotosoderzhaschey-rudy-mestorozhdeniya-aktobe>.
- [2]. Коннова Н.И., Пехова Л.П., Гольсман Д.А., Ананенко К.Е. Особенности гравитационного обогащения золотоносных кор выветривания // ГИАБ. 2013. №10.
- [3]. <https://www.techade.ru/stati/gravitatsionnoe-obogashchenie-zolotosoderzhchikh-rud>
- [4]. Холикулов, Д.Б., Самандаров, И.Р. Подготовка технологической пробы окисленных медных руд месторождений Кальмакыр к лабораторным испытаниям // ORIENSS. 2024. №6.
- [5]. Холикулов Д.Б., Ниязметов Б.Е., Бекбулаев А.Н., Гайратов Б.Г. Исследование по извлечению меди из окисленных руд АО «Алмалыкский ГМК» агитационным сернокислотным выщелачиванием. // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Холикулов Д.Б. [и др.]. 2022. 1(94). С. 46-51.
- [6]. Санакулов К.С. Перспективы переработки окисленных медных руд месторождения Кальмакыр. Горный вестник Узбекистана, №3. 2009. стр.47-50.
- [7]. Рахманов И.Ю., Абдурахмонов С.А., Шакаров Т.И., Результаты исследований по изучению физико-химических свойства забалансовых окисленных руд месторождения «Кальмакыр». Горный вестник Узбекистана, №1 (88). 2022. стр. 47-50. DOI:10.54073/GV.2022.1.88.014.
- [8]. Холикулов Д.Б., Бекбулаев А.Н., Ниязметов Б.Е., Нормуротов Р.И. Переработка окисленных медных руд месторождения Кальмакир. Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: труды V Конгресса с международным участием и конференции молодых ученых «ТЕХНОГЕН-2021». – Екатеринбург: УрО РАН, 2021 – 420 с. С. 132-135.
- [9]. Аксенов А.В., Васильев А.А., Яковлев Р.А., Серёдкин Ю.Г. Опыт исследования и разработки технологии кучного выщелачивания окисленных руд медно-порфировых месторождений // Вестник ИрГТУ. 2013. №6 (77).



- [10]. Вохидов Б.Р., Бабаев М.Ш. Исследование отвальных руд с извлечением меди и благородных металлов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2022. 11(104). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14628>.
- [11]. Саидахмедов А.А., Амриддинов М.К., Муродиллаева С.О. Исследование переработки окисленных забалансовых руд АО «Алмалыкский ГМК» // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2023. 11(116).
- [12]. Зубков А.А., Абрамов А.А., Шуленина З.М. Поведение водорастворимой меди при переработке окисленных медных руд. Цветные металлы. 2012. <https://rudmet.ru/journal/883/article/13890>.
- [13]. Q.Y. Sheng, W.Z. Yin, B. Yang, K.Q. Chen, H.R.Sun. Promotion of oxidation pretreatment on sulfidation of cuprite surface and its contribution to flotation Miner Eng, 174 (2021), Article 107256.
- [14]. Воробьев А.Е., Зубков А.А., Чекушина Т.В. Перспективные технологии переработки окисленных руд и металлоносных растворов // Обогащение руд. 2010. № 3. С. 26–30.
- [15]. Козин В.З. Исследование руд на обогатимость: учебное пособие. – 3-е изд., перераб./ В.З.Козин; Урал. гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2020. 188 с.
- [16]. Арипов Аваз Розикович, Холикулов Дониёр Бактиёрович, Гусейнов Р. К., Ахтамов Фозил Эркинович, Мамараимов Гайрат Фарходович. Обогащение вермикулитовых руд караузякского месторождения Республики Каракалпакистан // Universum: технические науки. 2021. №3-1 (84). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obogaschenie-vermikulitovyh-rud-karauzyakskogo-mestorozhdeniya-respubliki-karakalpakistan>.
- [17]. Прогрессивные технологии комплексной переработки минерального сырья / под ред. В. А. Чантuria. – М.: ИД «Руда и Металлы», 2008. – 283 с.
- [18]. Морозов Ю.П. Повышение комплексности использования сульфидных руд на основе дополнительного извлечения золота. – Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2015. – 61 с.
- [19]. Samadov A. U., Xoliqulov D. B., M. S. T. (2018). EXTRACTION IRON AND ITS COMPOUNDS FROM SLAGS BY USING GRAVITATION METHODS. European Science Review, (9–10), 231–234. <https://doi.org/10.29013/ESR-18-9.10.1-231-234>.
- [20]. Статистическая обработка экспериментальных данных: методические указания к лабораторным работам (цикл лабораторных работ) / составитель Ю.Я.Кацман; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 38 с.
- [21]. Sundar S. Sombhatla, Ashish Kumar, Kiran Kr. Rokkam, Sheeba M., Akhilesh Shukla. In-house copper sulphate extraction from gold purification cake at Hindustan zinc refineries // Proceedings of the XXIX International Mineral Processing Congress. – Moscow, 2018. P. 2876–2886.
- [22]. Yang Li, Yaping Liu, Yuhui Fu, Ziliang Liu, Peilong Wang, Jun Yin, Jue Kou, Chunbao Sun, Wanxiang Liu. Enhanced leaching of copper from refractory oxidized copper ore by calcium fluoride: Behavior and mechanism, Green and Smart Mining Engineering, Volume 1, Issue 1, 2024, Pages 85-95, <https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.03.006>.
- [23]. Исройлов А.Т., Ходжаев А.Р., Ниязметов Б.Е., Холикулов Д.Б. Обогащение забалансовых медных руд месторождения «Кальмакир» АО «Алмалыкский ГМК» // Материалы междунар. науч.-практической конф. «Современные проблемы и инновационные технологии решения вопросов переработки техногенных месторождений Алмалыкского ГМК», г. Алмалык, 18–19 апреля 2019 г. – С. 58–60.



- [24]. Абдурахмонов С.А., Холикулов Д.Б., Пиримов А.П., Нормуротов Р.И., Назаров В.Ф. Статистическая обработка показателей ионной флотации металлов из сернокислых растворов. Горный вестник Узбекистана, Навоий, 2005 № 4 с. 67-69
- [25]. Вершкова Ю.А., Маслобоев В.А., Локшин Э.П. Исследование соосаждения редкоземельных элементов с гипсом экспериментально-статистическим методом // Тезисы докл. конференции "Металлургические технологии и экология", (Санкт-Петербург, 10 ноября 1999г.), - Руда и металлы, 1999. –С.25-26.
- [26]. Вершкова Ю.А. Извлечение редкоземельных элементов методом ионной флотации при азотнокислотной переработке апатита. Специальность 05.16. 03 - Металлургия цветных и редких металлов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. –2000, Апатиты.