

Научная статья
УДК 54.06:669.213.1
DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-2-82-92

Минералого-геохимические особенности золотосодержащих руд месторождения Пакрут (Центральный Таджикистан) как основа гравитационного обогащения

Холмахмад Исроилович Холов¹, Ансор Сохибович Ниёзов²,
Шерзод Рабимкулович Джуракулов³, Шонавруз Рахимович Самихов⁴

^{1,3,4}Институт химии им. В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана, г. Душанбе, Таджикистан;

²Таджикский национальный университет, г. Душанбе, Таджикистан

¹Kholmahmad90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8202-5919>,

²aniyozov@bk.ru, ³Sherzod_89@mail.ru, ⁴samikhov72@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию
28.12.2023

Одобрена после
рецензирования 30.04.2024

Принята к публикации
20.05.2024

Ключевые слова:

Таджикистан,
месторождение золота
Пакрут, электрум,
пирит, арсенопирит,
минералогия, геохимия,
помол, встряхивающий
стол, извлечение,
гравитационное
обогащение

Горнодобывающий сектор, в частности золотодобыча, играет важную роль в экономике г. Таджикистана. В настоящее время актуальным является вопрос оптимизации механизмов золотодобычи, повышения её эффективности и расширения ресурсной базы. Истощение легкодоступных месторождений золота стимулирует разработку методов извлечения золота из упорных и бедных руд. Один из перспективных методов предварительной обработки таких руд – гравитационное обогащение. Цель исследования – охарактеризовать золотосодержащее месторождение Пакрут, определить его минералогический и химический состав, а также разработать оптимальную схему гравитационного обогащения для извлечения золота. Задачи исследования: изучение минералогического состава и геохимических характеристик золотосодержащих руд; разработка методики их гравитационного обогащения. Объект исследования – золотосодержащие руды месторождения Пакрут (Центральный Таджикистан). Материалы и методы исследования: аналитические работы и обогащение в лабораторных условиях выполнены в химической лаборатории СП «Пакрут», лаборатории обогащения руд Института химии им. В. И. Никитина НАНТ, ЦХЛ Главного геологического управления при Правительстве Республики Таджикистан. Установлено, что золото в рудах Пакрута представлено в основном в виде природного золота и электрума. Основными золотосодержащими минералами являются пирит, арсенопирит, сфалерит, галенит, джеймсонит и некоторые жильные минералы. Содержание золота в руде составляет около 6 г/т. Гранулометрический состав золота крайне неравномерный. Большинство частиц золота имели размер менее 10 мкм и были покрыты золотосодержащими минералами, что затрудняло достижение высвобождения во время измельчения. В соответствии с характеристиками месторождения золота гравитационный метод обогащения использовался для извлечения высвобождённого крупного золота. Исследования показали, что процесс гравитационной сепарации использован для первичной обработки руды с целью извлечения крупных частиц золота. Содержание и извлечение золота в концентратах гравитационной сепарации составили 46,58 г/т и 44,59 % соответственно.

Благодарности: авторы выражают благодарность сотрудникам химической лаборатории СП «Пакрут» и ЦХЛ Главного геологического управления при Правительстве Республики Таджикистан за помощь в проведении экспериментов, входящих в данное исследование.

Original article

Mineralogical and Geochemical Features of the Gold-Containing Ores of the Pakrut Deposit (Central Tajikistan) As the Basis of Gravity Enrichment

Kholmahmad I. Kholov¹, Anzor S. Niyozov², Sherzod R. Juraqulov³, Shonavruz R. Samikhov⁴

^{1,3,4}V. I. Nikitin Institute of Chemistry, NAST, Dushanbe, Tajikistan;

²Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan

¹kholmahmad90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8202-5919>,

²aniyozov@bk.ru, ³Sherzod_89@mail.ru, ⁴samikhov72@mail.ru

Information about the article

Received December 28, 2023

Approved after review
April 30, 2024

Accepted for publication
May 20, 2024

Keywords:

Tajikistan, Pakrut gold deposit, electrum, pyrite, arsenopyrite, mineralogy, geochemistry, grinding, shaking table, extraction, gravity enrichment

The mining sector, in particular gold mining, plays an important role in the economy of Tajikistan. Today, the issue of optimizing gold mining mechanisms, increasing its efficiency and expanding the resource base is of topical importance. The depletion of easily accessible gold deposits is stimulating the development of methods for extracting gold from refractory and low-grade ores. One of the promising methods of pre-treatment of such ores is gravity enrichment. The aim of the study is to characterize the Pakrut gold deposit, to determine its mineralogical and chemical composition, and to develop an optimal gravity enrichment scheme for gold recovery. Research objectives are as follows: to study the mineralogical composition and geochemical characteristics of gold-bearing ores, and then to develop a technique for their gravitational enrichment. The object of the study is the gold-bearing ores of the Pakrut deposit (Central Tajikistan). Materials and methods of research: analytical work and enrichment in laboratory conditions were carried out in the chemical laboratory of the Pakrut Joint Venture, the ore enrichment laboratory of the V. I. Nikitin Institute of Chemistry of NANT, the Central Committee of the Main Geological Directorate under the Government of the Republic of Tajikistan. It is found that gold in the Pakrut ores is mainly represented by native gold and electrum. The main gold-bearing minerals are pyrite, arsenopyrite, sphalerite, galena, jamesonite and some vein minerals. The gold content in the ore is about 6 g/t. The granulometric composition of gold is extremely uneven. Most of the gold particles are less than 10 μm in size and are coated with gold-bearing minerals, which hindered their release during grinding. In accordance with the characteristics of the gold deposit, gravity enrichment method has been used to extract the liberated coarse gold. Studies have shown that the gravity separation process is used for the primary processing of ore to recover coarse gold particles. The gold content and recovery in the gravity separation concentrates are 46.58 g/t and 44.59 %, respectively.

Acknowledgements: authors express their gratitude to the staff of the chemical laboratory of the Pakrut Joint Venture and the Central Committee of the Main Geological Department under the Government of the Republic of Tajikistan for their assistance in conducting experiments included in this study.

Введение. В связи с быстрым истощением месторождений золота, которые легко поддаются обработке, и для обеспечения устойчивости ресурсов большое внимание уделяется исследованиям по извлечению и технологии использования месторождений с упорными и бедными золотом рудами [14].

Наилучший процесс предварительной обработки в конечном итоге определяется геологическим процессом формирования и минералогией месторождения золота. Как правило, высвобожденное самородное золото извлекается путём гравитационной сепарации. Обычное оборудование для гравитационного разделения включает концентрационный стол, спиральный желоб и отсадочный концентратор. Эффективность обо-

рудования для гравитационного разделения тесно связана с характеристиками размера и формы золотых частиц: чем мельче частицы золота, тем труднее их извлекать [2; 3]. В сульфидных упорных золотых рудах золото тонко вкраплено и заключено в сульфидных минералах, таких как пирит, арсенопирит [4; 15; 16; 26], частично галенит, в форме микро- или субмикрочастиц, и часто извлекается с данными сульфидными минералами методом флотации. Собиратели тиолов, такие как ксантаты и дитиофосфаты, являются наиболее широко используемыми флотационными реагентами в золотодобывающей промышленности, которые увеличивают разницу в гидрофобности между сульфидами и пустой породой [3].

Цианидное выщелачивание – традиционный и разработанный процесс, который эффективен для извлечения золота из упорных и бедных руд. Однако цианид постепенно был заменён другими выщелачивающими средствами, такими как ацетилтиомочевина, тиосульфат [14; 24], глицин, тиомочевина и другими [22; 25], из-за его сильной токсичности и серьёзного ущерба окружающей среде. В настоящее время изучается всё больше новых биологических и гидрометаллургических подходов для извлечения золота из упорных золотосодержащих сульфидных руд. Хотя биометаллургия является экологически чистой, она не применялась в больших масштабах из-за слишком длительного производственного цикла и строгих экологических требований к бактериям [14; 20].

Месторождение золота, содержащее пирит и арсенопирит, находится на южном склоне Гиссарского хребта, в Центральном Таджикистане. По схеме тектонического районирования [12] район входит в состав Зеравшано-Гиссарской структурно-формационной зоны Южного Тянь-Шаня [5].

Месторождение Пакрут открыто в 70-х гг. XX в. геологом Н. Н. Кузнецовым при геолого-поисковых работах. Геология, минералогия, геохимия и условия образования месторождения Пакрут изучены А. Х. Хасановым, М. М. Мамадвафоевым, А. С. Ниёзовым, В. А. Буряком, В. Е. Минаевым, Н. Ф. Набиевым и др. [6; 7; 12; 13]. По генетическим особенностям месторождение относится к золотокварцевой мало-сульфидной формации.

Известно, что золото предварительно обогащается методом комбинирования [1; 2], а полученный золотосодержащий концентрат транспортируется на металлургический завод для извлечения золота металлургическим методом [10]. Содержание золота в исходной руде относительно высокое, как показано в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Химический анализ исходной руды /
Chemical analysis of the raw ore

Содержание элемента, мас. % / Element content, mass, %								
S	Fe	Cu	Zn	As	Sb	Pb	Ag*	Au*
0,68	3,16	0,088	0,008	0,34	<0,006	0,022	2,54	5,83

*Единицы измерения – Au и Ag, г/т / *The units of Au and Ag are, g/t.

В реальном производственном процессе, независимо от процесса предварительной обработки с использованием гравитационного разделения встряхивающего стола или флотации, извлечение золота не может достичь ожидаемых показателей [19; 27]. В то же время высокое содержание мышьяка в золотосодержащих концентратах увеличивает влияние на окружающую среду при последующих процессах обработки.

Объект исследования – золотосодержащие руды месторождения Пакрут (Центральный Таджикистан).

Предмет исследования – изучение минералого-геохимического состава золотосодержащей руды месторождения Пакрут, обогащение руды гравитационным методом и предложение на его основе технологической схемы.

Цель исследования – охарактеризовать месторождение золота с высоким содержанием серы и мышьяка, определить химический элементный, минералогический состав, а также разработать оптимальную схему гравитационного обогащения для извлечения золота. По результатам технологической минералогии проанализированы причины низкой эффективности обогащения и возможности удаления мышьяка из золотосодержащего концентрата, а также предложен оптимальный процесс предварительной обработки для рационального и эффективного извлечения золота из руды.

Задачи исследования:

- 1) изучение минералогического состава и геохимических характеристик золотосодержащих руд;
- 2) разработка методики их гравитационного обогащения.

Материалы и методы исследования. И использованные образцы получены из мышьяко-серосодержащего золота месторождения Пакрут. Отобранная проба смешивалась пропорционально с пробами руды в каждой точке добычи. Все пробы подвергнуты дроблению, грохочению и измельчению до -2 мм. Измельчённая средняя проба направлена на химический анализ.

Аналитические работы и обогащение в лабораторных условиях выполнены в химической лаборатории СП «Пакрут», лаборатории обогащения руд Института химии им. В. И. Никитина НАНТ, ЦХЛ Главного геологического управления при Правительстве Республики Таджикистан.

Аппараты и приборы. Образцы весом 500 г с размером частиц 100 %, составляющим 2 мм, измельчали в закрытой конической шаровой мельнице ХМҚ из нержавеющей стали Ø240×90 мм² (Китай) при концентрации суспензии 66 % (массовая концентрация). Испытания на гравитационное разделение проводили на встряхивающем столе LY1100-500 (Китай).

Вещественный состав руды. На Пакрутском золоторудном месторождении обнаружено около 60 минеральных видов. Из рудных минералов наиболее распространёнными являются пирит, арсенопирит и гематит, меньшее развитие имеют сфалерит, галенит, халькопирит, блёклая руда, антимонит, буланжерит, бурнонит, пирротин, магнетит и джемсонит. К редким минералам относятся шеелит, касситерит, киноварь, цинкистая медь, самородный алюминий, самородное железо, иоцит, каттьерит, алтаит и иссит. Кроме того, на месторождении найдены рутил, ильменит, лейкоксен, сфен, анатаз и другие минералы.

Нерудные минералы имеют широкое развитие и представлены кварцем, кальцитом, доломитом, анкеритом, сидеритом, баритом, арагонитом и флюоритом. Из других нерудных минералов следует отметить альбит, мусковит (серицит), хлорит, апатит, турмалин, циркон и др.

Гипергенные минералы представлены гётитом, скородитом, малахитом, азуритом, вульфенитом, ярозитом, церусситом, смитсонитом, лейкоксеном и др. Результаты элементного анализа проб методом РФА приведены в табл. 2.

Рентгенограмма исходной руды представлена на рис. 1. Результаты количественного анализа РФА показали, что содержание кварца, талька, оксида алюминия, железа (III), железа (II), марганца, магния, кальция, калия, натрия, фосфора (V), серы, диоксида углерода, воды и других компонентов в руде составляло от 39,28–92,38, 14,97, 1,49–23,06, 0,93–10,58, 0,01–0,38, 0,10–6,12, 0,84–12,33, 0,20–7,54, 0,19–8,45, 0,01–0,73, 0,00–0,05, 0,20–7,92, 0,02–0,48, 0,38–14,79 % соответственно.

Таблица 2 / Table 2

Элементный анализ проб методом РФА (массовая доля, %) / Elemental analysis of samples by XRD method (mass fraction, %)

№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O	п.п.п. / cal.los.	Итого / Total
1	69,60	0,35	14,15	0,42	3,81	0,07	1,79	1,40	0,20	5,69	0,16	0,48	0,12	2,42	100,66
2	47,00	2,38	17,31	4,00	9,00	0,23	4,79	3,22	0,70	3,84	0,73	1,16	0,10	6,15	100,61
3	39,28	2,35	13,59	3,59	8,42	0,23	5,20	11,97	0,70	2,88	0,24	7,92	0,11	3,33	99,81
4	66,86	0,66	15,28	0,72	4,17	0,06	2,12	0,98	2,09	3,26	0,20	0,53	0,10	3,09	100,12
5	64,43	0,75	15,65	0,65	5,47	0,07	2,91	1,12	1,73	3,49	0,19	0,20	0,00	3,11	99,77
6	43,75	2,65	16,01	6,01	7,20	0,20	4,58	11,07	0,50	2,88	0,26	1,71	0,07	3,86	100,75
7	69,09	0,60	12,38	1,39	3,17	0,07	1,79	2,38	2,09	2,69	0,19	1,40	0,05	2,73	100,02
8	75,03	0,35	8,75	0,83	3,59	0,10	1,55	2,80	0,60	2,36	0,19	1,89	0,19	0,90	99,13
9	70,62	0,59	11,91	0,89	3,24	0,06	1,55	2,59	1,60	2,70	0,16	1,89	0,05	2,72	100,57
10	90,30	0,21	3,63	0,48	1,37	0,01	0,39	0,84	0,40	0,60	0,04	0,57	0,06	1,16	100,06
11	92,38	0,04	1,49	0,42	0,93	0,02	0,17	2,24	0,30	0,19	0,03	1,41	0,02	0,57	100,21
12	71,28	0,12	12,47	0,32	1,08	0,02	0,31	4,34	3,08	3,83	0,01	2,68	0,07	1,07	100,68
13	69,79	0,35	14,74	2,70	1,58	0,06	0,61	2,34	4,70	3,13	0,10	0,05	0,12	0,38	100,65
14	70,44	0,35	14,55	1,56	1,94	0,07	0,82	2,64	3,97	3,27	0,10	0,05	0,00	0,46	100,22
15	54,48	0,26	22,30	2,44	1,62	0,09	0,41	1,76	6,33	8,49	0,03	0,05	0,14	1,76	100,16
16	56,93	0,17	22,11	2,86	1,72	0,11	0,36	1,17	6,75	6,07	0,03	0,05	0,48	1,58	100,39
17	60,16	0,17	19,66	1,74	2,42	0,14	0,05	1,61	7,12	6,10	0,05	0,05	0,08	0,98	100,33
18	46,57	1,66	14,36	2,09	6,57	0,14	6,12	10,26	4,10	2,43	0,27	0,05	0,10	5,44	100,16
19	56,67	0,30	20,22	2,28	2,62	0,14	0,20	2,05	7,54	6,07	0,09	0,05	0,24	1,74	100,21

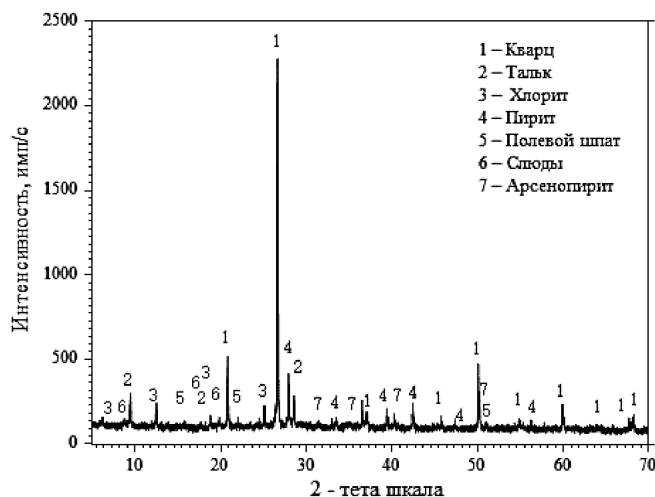


Рис. 1. Рентгенограмма исходной руды /
Fig. 1. X-ray of the initial ore

Золото в основном содержится в виде природного золота. По мере увеличения количества серебра в золоте цвет золота под микроскопом менялся с золотисто-жёлтого до ярко-жёлтого. Золото в основном встречается в виде вмещающего золота, золота в трещинах и межзёрненного золота в пирите, арсенопирите, сфалерите, джеймсоните и пустых породах (гангах).

Самородное золото. Самородное золото на Пакрутском месторождении, находящееся в основном в свободном виде, представлено тонкодисперсной (невидимой) пылевидной вкраплённостью в виде комковидных, каплевидных, овальных, плёночных, изометричных, бесформенных и пластинчатых выделений. В исключительно редких случаях золото находится в виде кристаллов октаэдрической формы. В сульфидах обнаружены эмульсионные включения округлой формы. Размещается золото в кварцевых и карбонатных зёрнах, на границе выделений этих двух минералов, в межзёрновых пространствах сульфидов, микротрещинках как нерудных, так и рудных минералов. Образует золото сростки с кварцем, карбонатами и другими минералами.

Наиболее золотоносными являются прожилково-вкраплённые руды с пиритом и арсенопиритом, причём золото в них является, главным образом, тонкодисперсным. Возможно, золото в пирите и арсенопирите находится в качестве изоморфной примеси в связи с близостью ионных радиусов железа и золота. На вероятность изоморфизма данных элементов в сульфидах железа указывал Ю. Г. Щербаков [17].

Видимые золотины в пирите и арсенопирите редки. Часто золото сростается с блёклыми рудами, в которых его содержание достигает 1,5 %. Нередко золото встречается в

кварце и карбонате, вне связи с сульфидами. Цвет золота – от соломенно-жёлтого до золотисто-жёлтого.

Золото в пирите. Пирит тесно связан с золотом и является главным золотоносным минералом [18]. В нём содержание этого минерала, вместе с арсенопиритом, составляет 0,7–8,4 %, достигая иногда 10 % от их объёма. Золото чаще появлялось в более кристаллизованном пирите. Установлено, что большая часть золота заключена в пирите в виде нерегулярных, зернистых, полосок, а небольшое количество золота распределено в трещинах и отверстиях в пирите под микроскопом. Большинство частиц золота имели размер менее 8 мкм.

В рудах пирит встречается в виде вкраплённостей изометрической и неправильной форм, отдельных кристаллов и тонких прожилков, просечек, как в метасоматически изменённых вмещающих сланцах, так и в жилах и прожилках кварца. Толщина отдельных прожилков минерала достигает 0,3–0,5 см при длине 5–6 см. Кристаллы пирита в основном кубического габитусного типа, реже встречаются пентагондодекаэдрические и октаэдрические формы.

Золото в арсенопирите. Арсенопирит также является основным золотоносным минералом и тесно связан с золотом. Распределение золота в арсенопирите было таким же, как в пирите. Большая часть мелкозернистого золота с размером частиц менее 10 мкм – высокодисперсная в арсенопирите. Основная масса арсенопирита сосредоточена в приконтактных зонах кварцевых жил с вмещающими сланцами. Кристаллы арсенопирита уплощённые, удлинённо-призматические с ромбовидным сечением, а также игольчатые.

Золото в других минералах. Помимо золота, распределённого в пирите и арсенопирите, небольшое количество золота распределено в других сульфидах и пустой породе. Золото в основном аккумулировалось на границе галенита, джамесонита и сфалерита. Золото в пустой породе имело гранулированную или неправильную форму. Крупные частицы золота в пустой породе имели размер около 40 мкм, а мелкие частицы – 3–5 мкм. Частицы золота в отверстиях пустой породы могли выпасть во время измельчения.

Пирит и арсенопирит. Пирит и арсенопирит являются основными сульфидами в руде [8; 9]. Гранулометрический состав пирита в руде неравномерный, пирит находится в форме самокристаллов, полусамокристаллов и других кристаллов. Внутри частиц пирита отмечалось много дырок и трещин. Крупнозернистые арсенопириты были скреплены вместе, чтобы сформировать массивный агрегат, а мелкозернистые арсенопириты были скреплены вместе, чтобы сформировать плотный агрегат. Пирит и арсенопириты тесно связаны друг с другом в руде. Мелкозернистый пирит, сцементированный арсенопиритом, образовывал плотную структуру, что затрудняло его отделение при измельчении. Межзерновые поры арсенопирита часто цементируются сфалеритом и галенитом. В то же время арсенопирит и пирит распространены и в других сульфидных минералах.

Прочие сульфиды. Металлические элементы Zn, Pb, Sb и Cu в руде в основном присутствуют в форме сфалерита, галенита, джемсонита и халькопирита. Сфалерит тесно связан с халькопиритом, а галенитовая руда тесно связана с джемсонитом в руде. Галенит и джемсонит обычно находились в форме симбионтов с неравномерным гранулометрическим составом руды. Некоторое количество арсенопирита распределено в джемсоните в гранулированной форме.

Результаты исследования. Результаты минералогического исследования показали, что золото в руде представлено преимущественно в виде природного золота. Основными золотосодержащими минералами являются пирит и арсенопирит, за ними следуют сфалерит, галенит, джамесонит и некоторые жильные минералы. Золотые частицы в руде наиболее часто встречаются в размере 5–10 мкм. Далее по распространённости идут частицы размером менее 1 мкм. Данное распределение отражает определённую закономерность. Наибольший размер частиц

составлял очень небольшую часть. Минералы пустых пород (гангов) состоят в основном из кварца, хлорита, полевого шпата слюд и др. Большая часть мелкозернистого золота, распределённого в пирите и арсенопирите, в основном полностью инкапсулирована, и её было трудно отделить. Кроме того, в кварце и других жильных минералах присутствовало немного золота в зернистой, неправильной форме. Связь между пиритом и арсенопиритом также была чрезвычайно тесной.

Согласно результатам минералогического исследования, частицы золота имели широкий диапазон гранулометрического состава. Природное золото в пустой породе и крупнозернистое золото, выделенное из сульфидной руды, можно было извлечь методом гравитационного разделения [21]. Однако мелкозернистое золото, связанное с сульфидами, являлось труднообогатимым, а извлечь его методом гравитационного разделения невозможно, что может быть причиной низкой эффективности гравитационного разделения в реальном производстве. Золото, связанное с сульфидами или мелкозернистым золотом, может быть максимально извлечено в сульфидный концентрат при флотации. Однако флотация не эффективна для извлечения крупнозернистого золота. В то же время слоистые силикатные минералы, такие как хлорит и тальк, обладали хорошей естественной плавучестью, легко всплывали вместе с сульфидной рудой, что могло привести к снижению качества концентрата, что может быть причиной низкой эффективности флотации в процессе реального производства. Ввиду того что часть мелкозернистого золота находится в диспергированном состоянии в арсенопирите, а связь между пиритом и арсеником крайне сложна, удаление мышьяка на этапе обогащения руды привело бы к снижению скорости извлечения золота.

Следовательно, золотосодержащие руды, содержащие мышьяк и серу, относятся к категории упорных [4].

В рудах рассматриваемого месторождения частицы золота, отделённые от пустой породы и сульфидных минералов после измельчения, могли бы быть извлечены методом гравитационного обогащения [11; 23; 27].

Гравитационное разделение. В соответствии с условиями участка, встряхивающий стол использовался в качестве оборудования для гравитационной сепарации для переработки этой руды. Эффективность встряхива-

ющего стола при извлечении крупных частиц золота была выше, чем у другого оборудования для гравитационного разделения, и оно меньше загрязняло окружающую среду. Исследовано влияние тонины помола и количества стадий гравитационных сепараций на технологические показатели получения концентрата гравитационной сепарацией.

Показатели продуктов измельчения, как показано в табл. 3, указывают на то, что 89,94 % золота находится в классах крупности менее 0,074 мм. Технологические параметры шаровой мельницы составляли: объём заполнения стальными шарами – 33 %, масса руды – 500 г, плотность пульпы – 66 мас. %. Встряхивающий стол с производительностью обработки 20 кг/ч, предназначенный для работы с пульпой плотностью 20 мас. %, имеет боковой уклон 0,65, объём горизонтальной промывки – 400 л/ч, ход деки стола – 16 мм, частоту хода – 450 мин⁻¹.

Результаты эксперимента показали, что с увеличением тонины помола содержание золота постепенно увеличивалось, а извлечение золота из сырьевой руды постепенно снижалось в концентрате при одностадийной гравитационной сепарации.

После того как тонина помола достигла 0,074 мм (73,56 % от исходной), содержание золота больше не повышалось. Это указывало на то, что мелкие частицы золота были более доступны для извлечения. Оптимальными параметрами помола определены: тонина – 0,074 мм, время – 2 мин 15 с.

Гравитационный концентрат подвергали многократной перемешке гравитационным методом с регулировкой угла наклона деки стола. Содержание золота в гравитационных концентратах увеличивалось, а извлечение золота снижалось с увеличением количества гравитационных сепараций. Поскольку разница в показателе между двухстадийной гравитационной сепарацией и трёхстадийной гравитационной сепарацией была незначительной, оптимальной принята двухстадийная сепарация. Содержание золота в гравитационном концентрате составляло около 46,0 г/т, а степень извлечения золота – около 60,0 %.

Результаты испытаний приведены в табл. 4. и на рис. 2, которые показывают, что в гравитационном концентрате содержание золота составляет 46,58 г/т, а извлечение золота – 44,59 %.

Таблица 3 / Table 3

Результаты ситового анализа руды / Results of sieve analysis of ore

Класс крупности, мм / Size class, mm	Выход / Yield, %	Содержание Au, г/т / Au content, g/t	Распределение Au, % / Au Distribution, %
-2,00+0,15	1,84	7,66	1,01
-0,15+0,106	17,56	6,02	5,44
-0,106+0,074	5,88	10,40	3,61
-0,074+0,038	32,57	16,94	34,62
-0,038	42,15	20,76	55,32
Итого / Total	100,00	7,96	100,00

Таблица 4 / Table 4

Результаты испытания методом гравитационной сепарации / Gravity separation test results

Продукт / Product	Выход, % / Output, %	Содержание Au, г/т / Au content, g/t	Извлечение Au, % / Au Extraction, %
Гравитационный концентрат / Gravity concentrate	5,58	46,58	44,59
Хвосты / Tailings	94,42	3,42	55,41
Исходная руда / Initial ore	100,00	5,83	100,00

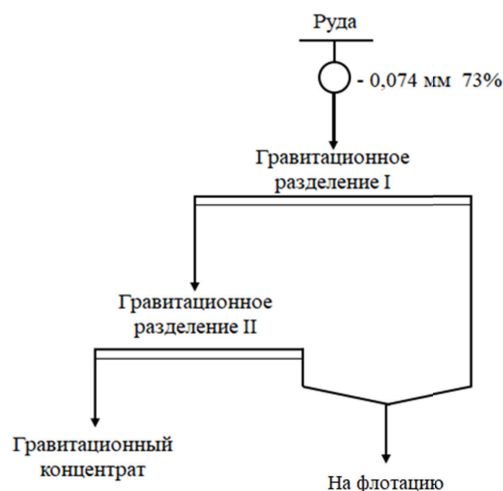


Рис. 2. Схема гравитационной сепарации / Fig. 2. Gravity separation scheme

Выводы. Результаты изучения вещественного состава золотосодержащей руды показали, что содержание золота в руде составляло около 6 г/т, и золото в основном находилось в форме природного золота и электрума. Основными золотосодержащими минералами являлись пирит, арсенопирит и некоторые жильные породы. Золотые частицы были неровными, большинство из которых представлено мелкими зёрнами крупностью 5–10 мкм. Другие металлические минералы в руде включали сфалерит, галенит и джаме-

сонит, а жильные минералы – кварц, слюду, полевой шпат, тальк и хлорит.

Согласно результатам исследований по обогащению, процесс гравитационной сепарации применён для первичной обработки руды с целью извлечения крупных частиц золота. Содержание и извлечение золота в концентратах гравитационной сепарации составили 46,58 г/т и 44,59 % соответственно. В дальнейшем нами планируется использовать комбинированное обогащение с достижением общего извлечения золота более 90 %.

Список литературы

1. Зверева Н. В., Мязин В. П. Повышение уровня извлечения золота при комбинированной переработке золотосодержащих свинцово-цинковых руд // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28, № 10. С. 6–14.
2. Зинченко З. А., Самихов Ш. Р. Переработка упорных золотосодержащих руд Таджикистана // Горный журнал. 2014. № 4. С. 97–98.
3. Камкин Р. И., Александров П. В., Фролов В. С. Реагенты BASF для кучного выщелачивания золотосодержащих руд // Золото и технологии. 2018. № 1. С. 70–71.
4. Комогорцев Б. В., Вареничев А. А. Проблемы переработки бедных и упорных золотосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 2. С. 204–218.
5. Кушаков А. Р., Романов С. А., Оналбаев Е. Р., Джуманиязов Д. И. Сармиентитизация – важный поисковый признак золоторудных месторождений Южного Тянь-Шаня // Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии: IV Всерос. науч. конф.: сб. докл. Благовещенск: ИГИП ДВО РАН, 2016. С. 73–78.
6. Мамадвафоев М. М., Гиниевский И. П. Геология и прогнозные ресурсы Укобхонинского золоторудного поля (Центральный Таджикистан) // Горный журнал. 2013. № 4. С. 14–18.
7. Мамадвафоев М. М., Ниезов А. С., Хасанов А. Х., Кривошекова Н. И. Геолого-геохимические особенности формирования даек и локализации золоторудного месторождения Пакрут (Центральный Таджикистан). Душанбе: Недра, 2008. 104 с.
8. Рахманов О. Б., Аксёнов А. В., Минеев Г. Г., Солихов М. М., Шомуродов Х. Р. Поиск рациональной технологии переработки упорных золотосодержащих руд с тонковкрапленным золотом месторождения «Иккижелон» (Северный Таджикистан) // iPolytech Journal. 2017. Т. 21, № 6. С. 119–127.
9. Сафонов Ю. Г. Актуальные вопросы теории образования золоторудных месторождений // Геология рудных месторождений. 2010. Т. 52, № 6. С. 487–511.
10. Сейсембаев Р. С., Кожаметов С. М., Квятковский С. А., Семенова А. С. Извлечение золота из упорных золотосодержащих руд сократительной пирометаллургической селекцией // Металлург. 2020. № 8. С. 49–55.
11. Суримбаев Б. Н., Каналы Е. С., Болотова Л. С., Шалгимбаев С. Т. Оценка гравитационной обогатимости золотосодержащей руды – GRG // Горные науки и технологии. 2020. Т. 5, № 2. С. 92–103.
12. Файзиев А. Р., Набиев Н. Ф. Генезис Пакрутского золоторудного месторождения (Центральный Таджикистан) // Геодинамика, вещество, рудогенез Восточно-Европейской платформы и её складчатого обрамления. 2017. С. 225–227.
13. Хасанов А. Х., Мамадвафоев М. М., Ефименко В. Н., Кузнецов Н. Н., Садков Н. И. Новые данные о геологии и возрасте кварц-золоторудного рудопроявления Гиссарского хребта // Известия АН Таджикской ССР, отд. физ.-матем. и геол.-хим. наук. 1978. № 4. С. 78–85.
14. Холов Х. И., Шарифбоев Н. Т., Самихов Ш. Р., Джуракулов Ш. Р., Зарифова М. С. Выщелачивание золота различными растворами, заменители цианида и их перспективы в будущем // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2021. № 14. С. 433–447. DOI: 10.17516/1999-494X-0324.
15. Холов Х. И., Самихов Ш. Р., Ниёзов А. С. Характеристика геологии, минералогический и химический состав руд месторождения Джижикрута // Евразийское Научное Объединение. 2018. № 12-6. С. 413–416.
16. Шадчиев А. С., Бахтдавлатов Р. Д. Геологическое строение и полезные ископаемые фанерозоя Кухистана (Центральный Таджикистан). Душанбе, 2008. 406 с.
17. Щербачев Ю. Г. Распределение и условия концентрации золота в рудных провинциях. М.: Наука, 1967. 270 с.

18. Юргенсон Г. А. Первые данные о ютенбогардите в руде Тасеевского золотосеребряного месторождения в Восточном Забайкалье (Россия) // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28, № 6. С. 26–36. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-6-26-36.
19. Ali D. Advanced Analytics for Mineral Processing // Advanced Analytics in Mining Engineering: Leverage Advanced Analytics in Mining Industry to Make Better Business Decisions. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 495–522.
20. Aylmore M. G. Alternative lixiviants to cyanide for leaching gold ores // Gold Ore Processing. Elsevier, 2016. P. 447–484.
21. Burt R. O. Gravity concentration methods // Mineral processing design. Springer, 1987. P. 106–137.
22. De Michelis I., Olivieri A., Ubaldini S., Ferella F., Beolchini F., Veglio F. Roasting and chlorine leaching of gold-bearing refractory concentrate: Experimental and process analysis // International Journal of Mining Science and Technology. 2013. Vol. 23, no. 5. P. 709–715.
23. Dominy S. C., O'Connor L., Glass H. J., Xie Y. Geometallurgical study of a gravity recoverable gold orebody // Minerals. 2018. Vol. 8, no. 5. P. 186–190.
24. Kononova O. N., Kholmogorov A. G., Kononov Y. S., Pashkov G. L., Kachin S. V., Zotova S. V. Sorption recovery of gold from thiosulphate solutions after leaching of products of chemical preparation of hard concentrates // Hydrometallurgy. 2001. Vol. 59, no. 1. P. 115–123.
25. Murthy D. S. R., Kumar V., Rao K. V. Extraction of gold from an Indian low-grade refractory gold ore through physical beneficiation and thiourea leaching // Hydrometallurgy. 2003. Vol. 68, no. 1–3. P. 125–130.
26. Samadov A. U., Nosirov N. I., Umirzqov A. A. Overview of the concepts of gold recovery from stale tailings of a gold recovery plant // Barqarorlik Va Yetakchi Tadqiqotlar Onlayn Ilmiy Jurnal. 2022. Vol. 2, no. 1. P. 3–8.
27. Stange F., Helle S., Collao S. Exploratory Potential for Gold Placer Deposits in the Coastal Range, BioBio Region, South-Central Chile // International Journal of Geosciences. 2018. Vol. 9, no. 11. P. 635–657.

References

1. Zvereva N. V., Myazin V. P. Increasing the level of gold recovery during the combined processing of gold containing lead-zinc ores. Transbaikal State University Journal, vol. 28, no. 10, pp. 6–14, 2022. (In Rus.)
2. Zinchenko Z. A., Samikhov S. R. Processing of molten gold-bearing ores of Tajikistan. Mining Journal, no. 4, pp. 97–98, 2014. (In Rus.)
3. Kamkin R. I., Alexandrov P. V., Frolov V. S. BASF reagents for heap leaching of gold-bearing ores. Gold and Technologies, no. 1, pp. 70–71, 2018. (In Rus.)
4. Komogortsev B. V., Varenichev A. A. The problems of processing poor and insistent gold bearing ores. Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal), no. 2, pp. 204–218, 2016. (In Rus.)
5. Ushakov A. R., Romanov S. A., Onalbayev E. R., Dzhumaniyazov D. I. Sarmientization is an important prospecting feature of the gold deposits of the Southern Tien Shan. Issues of geology and integrated development of natural resources in East Asia: IV All-Russian Scientific Conference: sat. dokl. Blagoveshchensk: IGIP FEB RAS, 2016. Pp. 73–78. (In Rus.)
6. Mamadvafoev M. M., Genievsky I. P. Geology and forecast resources of the Ukobhoninsky gold field (Central Tajikistan). Mining Journal, no. 4, pp. 14–18, 2013. (In Rus.)
7. Mamadvafoev M. M., Niyozov A. S., Khasanov A. H., Krivoshekova N. I. The geological and geochemical properties of formation of dykes and localization of the Pakrut gold-ore deposit (Central Tajikistan), Moscow: Nedra, 2008. 104 p. (In Rus.)
8. Rakhmanov O. B., Aksenov A. V., Mineev G. G., Solikhov M. M., Shomurodov H. R. Search for a rational technology for processing stubborn gold-bearing ores with finely impregnated gold from the Ikkizhelon deposit (Northern Tajikistan). iPolytech Journal, vol. 21, no. 6, pp. 119–127, 2017. (In Rus.)
9. Safonov Y. G. Topical issues of the theory of gold deposit formation. Geology of Ore Deposits, vol. 52, no. 6, pp. 487–511, 2010. (In Rus.)
10. Seisembaev R. S., Kozhakhmetov S. M., Kvyatkovsky S. A., Semenova A. S. Extraction of gold from refractory gold-bearing ores by means of reducing pyrometallurgical selection. Metallurg, no. 8, pp. 49–55, 2020. (In Rus.)
11. Surimbaev B. N., Channels E. S., Bolotova L. S., Shalgimbaev S. T. Assessment of gravitational enrichment of gold-bearing ore-GRG. Mining Science and Technology, vol. 5, no. 2, pp. 92–103, 2020. (In Rus.)
12. Fayziev A. R., Nabiev N. F. Genesis of the Pakrut gold deposit (Central Tajikistan). Geodynamics, Substance, Ore Genesis of the East European Platform and Its Folded Frame, 2017. Pp. 225–227. (In Rus.)
13. Khasanov A. H., Mamadvafoev M. M., Efimenko V. N., Kuznetsov N. N., Sladkov N. I. New data on the geology and age of the quartz-gold ore occurrence of the Gissar ridge. Proceeding of the Academy of Sciences of the Tajik SSR, dep. of phys.-math. and geol.-chem. sciences, no. 4, pp. 78–85, 1978. (In Rus.)
14. Kholov K. I., Sharifboev N. T., Samikhov S. R., Dzhurakulov S. R., Zarifova M. S. Gold leaching by various solutions, alternative of cyanide and their prospects in the future. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, vol. 14, no. 4, pp. 433–447, 2021. DOI: 10.17516/1999-494X-0324. (In Rus.)

15. Kholov Kh. I., Samikhov Sh. R., Niyozov A. S. Characteristics of geology, mineralogical and chemical composition of ores of the Dzhizhikrut deposit. Eurasian Scientific Union, no. 6, pp. 413–416, 2018. (In Rus.)
16. Shadchinev A. S., Bakhtdavlatov R. D. Geological structure and minerals of the Phanerozoic of Kuhistan (Central Tajikistan). Dushanbe, 2008. 406 p. (In Rus.)
17. Scherbakov Y. G. Distribution and conditions of gold concentration in ore provinces. Moscow: Nauka, 1967. 270 p. (In Rus.)
18. Yurgenson G. The first data from Uytенbogaardite in the ore of the taseyevskoye gold-silver deposit in Eastern Transbaikalia (Russia). Transbaikal State University Journal, vol. 28, no. 6, pp. 26–36. 2022. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-6-26-36. (In Rus.)
19. Ali D. Advanced Analytics for Mineral Processing. Advanced Analytics in Mining Engineering: Leverage Advanced Analytics in Mining Industry to Make Better Business Decisions. Cham: Springer International Publishing, 2022. Pp. 495–522. (In Eng.)
20. Aylmore M. G. Alternative lixivants to cyanide for leaching gold ores. Gold Ore Processing. Elsevier, 2016. Pp. 447–484. (In Eng.)
21. Burt R. O. Gravity concentration methods. Mineral processing design. Springer, pp. 106–137, 1987. (In Eng.)
22. De Michelis I., Olivieri A., Ubaldini S., Ferella F., Beolchini F., Veglio F. Roasting and chlorine leaching of gold-bearing refractory concentrate: Experimental and process analysis. International Journal of Mining Science and Technology, vol. 23, no. 5, pp. 709–715, 2013. (In Eng.)
23. Dominy S. C., O'Connor L., Glass H. J., Xie Y. Geometallurgical study of a gravity recoverable gold orebody. Minerals, vol. 8, no. 5, pp. 186–190, 2018. (In Eng.)
24. Kononova O. N., Kholmogorov A. G., Kononov Y. S., Pashkov G. L., Kachin S. V., Zotova S. V. Sorption recovery of gold from thiosulphate solutions after leaching of products of chemical preparation of hard concentrates. Hydrometallurgy, vol. 59, no. 1, pp. 115–123, 2001. (In Eng.)
25. Murthy D. S. R., Kumar V., Rao K. V. Extraction of gold from an Indian low-grade refractory gold ore through physical beneficiation and thiourea leaching. Hydrometallurgy, vol. 68, no. 1–3, pp. 125–130, 2003. (In Eng.)
26. Samadov A. U., Nosirov N. I., Umirzoqov A. A. Overview of the concepts of gold recovery from stale tailings of a gold recovery plant // Barqarorlik Va Yetakchi Tadqiqotlar Onlayn Ilmiy Jurnali, vol. 2, no. 1, pp. 3–8, 2022. (In Eng.)
27. Stange F., Helle S., Collao S. Exploratory Potential for Gold Placer Deposits in the Coastal Range, BioBio Region, South-Central Chile. International Journal of Geosciences, vol. 9, no. 11, pp. 635–657, 2018. (In Eng.)

Информация об авторах

Холов Холмахмад Исроилович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт химии им. В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана, г. Душанбе, Таджикистан; kholmahmad90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8202-5919>. Область научных интересов: обогащение руд цветных металлов, теория и технология флотации, химические основы флотации, гидрометаллургия, геология, минералогия.

Ниёзов Ансор Сохибович, канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры горно-технического менеджмента, Таджикский национальный университет, г. Душанбе, Таджикистан; aniyozov@bk.ru. Область научных интересов: геология, минералогия.

Джуракулов Шерзод Рабимкулович, соискатель, Институт химии им. В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана, г. Душанбе, Таджикистан; Sherzod_89@mail.ru. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, геология, минералогия.

Самихов Шонаеруз Рахимович, д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт химии им. В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана, г. Душанбе, Таджикистан; samikhov72@mail.ru. Область научных интересов: теория и технология гидрометаллургия тяжелых цветных и благородных металлов.

Information about the author

Kholov Kholmahmad I., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, V. I. Nikitin Institute of Chemistry, NAST, Dushanbe, Tajikistan; kholmahmad90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8202-5919>. Research interests: enrichment of non-ferrous metal ores, theory and technology of flotation, chemical bases of flotation, hydrometallurgy, geology, mineralogy.

Niyozov Anzor S., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, Mining and Technical Management department, Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan; aniyozov@bk.ru. Research interests: geology, mineralogy.

Juraqulov Sherzod R., Applicant for Scientific Degree, V. I. Nikitin Institute of Chemistry, NAST, Dushanbe, Tajikistan; Sherzod_89@mail.ru. Research interests: mineral processing, geology, mineralogy.

Samikhov Shonavrur R., Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, V. I. Nikitin Institute of Chemistry, NAST, Dushanbe, Tajikistan; samikhov72@mail.ru. Research interests: theory and technology of hydrometallurgy of heavy non-ferrous and precious metals.

Вклад авторов в статью

Холов Х. И. – разработка идеи исследования, анализ разработанности темы, разработка технологической схемы, формулировка выводов, подбор библиографии, написание текста.

Ниёзов А. С. – анализ полученных результатов по геологии и минералогии.

Джуракулов Ш. Р. – обработка результатов исследований с применением программы Microsoft Excel.

Самихов Ш. Р. – исполнение экспериментальных работ, непосредственное руководство экспериментальными исследованиями.

The authors' contribution to the article

Kholov Kh. I. – development of the research idea, analysis of the topic development, development of the technological scheme, formulation of conclusions, selection of bibliography, writing the text.

Niyozov A. S. – analysis of the results obtained in geology and mineralogy.

Juraqulov Sh. R. – processing of the research results, using program Microsoft Excel.

Samikhov Sh. R. – performing of experimental works, direct management of experimental research.

Для цитирования

Холов Х. И., Ниёзов А. С., Джуракулов Ш. Р., Самихов Ш. Р. Минералого-геохимические особенности золотосодержащих руд месторождения Пакрут (Центральный Таджикистан) как основа гравитационного обогащения // Вестник Забайкальского государственного университета. 2024. Т. 30, № 2. С. 82–92. DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-2-82-92.

For citation

Kholov Kh. I., Niyozov A. S., Juraqulov Sh. R., Samikhov Sh. R. Mineralogical and Geochemical Features of the Gold-Containing Ores of the Pakrut Deposit (Central Tajikistan) as the Basis of Gravity Enrichment // Transbaikal State University Journal. 2024. Vol. 30, no. 2. P. 82–92. DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-2-82-92.