ISSN 1999-4125 (Print) **ISSN 2949-0642 (Online)**

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ
MINERAL PROCESSING

Научная статья
УДК 55.033.71 (621.385)
DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-175-187

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИИ И ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ ЗОЛОТО-СУРЬМЯНО-РТУТНЫХ РУД ДЖИЖИКРУТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Холов Холмахмад Исроилович [1, 2 *], Самихов Шонавруз Рахимович [1], Курбонов Шодком Ахмадбоевич [1]

[1] Институт химии имени В.И. Никитина НАН Таджикистана,
[2] Таджикский государственный педагогический университет имени С. Айнӣ

[*] для корреспонденции: Kholmahmad90@mail.ru

Аннотация.
Джижикрутское месторождение, расположенное в Зеравшано-Гиссарском сурьмяно-ртутном поясе, представляет собой уникальное джаспероидное месторождение с ярко выраженными штокверкообразными рудными телами и сложной многослойной структурой, включающей доломитовые брекчии. Проведенные исследования по обогащению руд нижних горизонтов показали возможность эффективного извлечения сурьмы и ртути методом флотации. В результате была получена сурьмяная концентратная марка КСуФ-3 с содержанием сурьмы 46,5% и степенью извлечения 89,9%. Однако значительная часть золота остается в хвостах флотации, что указывает на необходимость разработки дополнительных технологических процессов для его извлечения.
В работе предложена технологическая схема флотации, адаптированная для условий Анзобской обогатительной фабрики (ТА ООО СП «Анзоб). Схема включает тонкое измельчение руды до 75% класса –0,063 мм, основную флотацию, две контрольные флотации и многоступенчатую перечистку концентрата. Такой подход обеспечивает оптимальное использование минерального сырья и максимальное извлечение сурьмы и ртути, а также сопутствующих ценных элементов, таких как таллий, селен и теллур.
Особое внимание уделено геологическим и минералогическим особенностям месторождения, которые влияют на выбор методов переработки. Уникальный состав руд, характеризующийся высоким содержанием тонковкрапленного золота и сложной ассоциацией минералов сурьмы и ртути, требует специализированных технологий обогащения. Несмотря на успешное извлечение сурьмы и ртути, остающееся в хвостах золото представляет потенциальный резерв для повышения экономической эффективности разработки месторождения.
Таким образом, проведенные исследования подтверждают перспективность использования флотационного метода для обогащения золото-сурьмяно-ртутных руд Джижикрутского месторождения и подчеркивают необходимость дальнейших исследований по извлечению золота из хвостов флотации.

CC BY

Информация о статье
Поступила:
04 декабря 2024 г.

Одобрена после рецензирования:
22 апреля 2025 г.

Принята к публикации:
30 апреля 2025 г.

Опубликована:
11 июня 2025 г.

Ключевые слова:
месторождение Джижикрут, джаспероидный тип, сурьма, ртуть, флотация, антимонит, минерализация, технологическая схема, золотосодержащие руды, рудоносные блоки, переработка руды, сопутствующие элементы.

Для цитирования: Холов Х.И., Самихов Ш.Р., Курбонов Ш.А. Особенности геологии и технологии обогащения золото-сурьмяно-ртутных руд Джижикрутского месторождения // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 2 (168). С. 175-187. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-175-187, EDN: RIMUUT

Введение

Месторождение Джижикрут входит в Зеравшано-Гиссарский сурьмяно-ртутный пояс (Пахруд-Ягнобская зона), расположенный параллельно Южно-Ферганскому поясу [1, 2]. Оно уникально тем, что представляет собой месторождение джаспероидного типа с четко выраженными штокверкообразными рудными телами. В отличие от других подобных месторождений, таких как Сигуаньшань [3], Джижикрут характеризуется сложным многослойным строением, включающим чередование горизонтов известняков, доломитов и сланцев. Некоторые слои дублируются по поверхностям пологих взбросо-надвигов [4].

Антиклинальная структура рудовмещающих пород здесь слабо выражена из-за сложного геологического строения и многочисленных крутопадающих разрывов, некоторые из которых активизировались после формирования руд. Это приводит к разнообразным структурным схемам, описанным в литературе по геологии Джижикрута. На флангах месторождения согласованность рудовмещающих брекчий прослеживается уверенно, однако в центральной части, по данным В. Э. Пояркова, основой является крупный грабенообразный блок. Этот блок подвергся интенсивному дроблению между двумя зонами крутопадающих нарушений, что привело к образованию массивных брекчий, позже избирательно окварцованных [4–6].

Основная масса рудных тел сосредоточена в этом блоке, где мощность брекчированных пород достигает 150 м. Рудные тела представлены системами крутопадающих минерализованных зон, пологих линз и гнезд, связанных серией разломов. Некоторые гнезда, особенно в лежачем боку блока и в подстилающих карбонатных породах, расположены в карстовых воронках, образовавшихся до и после рудообразования. Связь рудных тел с карстовыми полостями впервые отмечена в 1965 г. А. С. Великим, В. Ю. Волгиным и В. И. Степановым [6, 7].

Отличия Джижикрута от других сурьмяных месторождений джаспероидного типа связаны с тем, что здесь метасоматозу кварцем подверглись преимущественно доломитовые брекчии, а не известняковые. Замещение доломита кремнеземом происходит сложнее из-за его меньшей растворимости и трудности заполнения пустот карбонатным материалом. Кроме того, сланцевый экран был менее эффективен из-за малой мощности и высокой тектонической нарушенности сланцев. Это обусловило штокверкообразное распределение оруденения и сложный состав рудовмещающих брекчий, где преобладают доломит-кварц-карбонатные брекчии, специфичные для Джижикрута [8].

Руды состоят главным образом из кристаллического антимонита, который цементирует брекчии и образует гнезда и прожилки. Характерной особенностью месторождения является присутствие значительных количеств киновари, особенно на верхних горизонтах, где она тесно связана с жильным доломитом. На некоторых участках содержание ртути достигает промышленно значимых уровней [2, 4].

Распределение сурьмяно-ртутного оруденения крайне неравномерно. Большинство рудных тел расположено в висячем боку брекчий под сланцевым экраном. Участки с богатым оруденением чередуются с зонами, где антимонит встречается лишь в виде редких вкраплений. Рудные тела преимущественно гнездо- и пластообразные, с антимонитом в виде вкрапленности, прожилков и гнезд [4, 9].

В меньшей степени присутствует ртутное оруденение в известняках лежачего бока и в зонах брекчирования крутопадающих разломов, где мелкие вкрапления киновари ассоциируют с кальцитом и баритом.

Помимо антимонита (Sb_2S_3) и киновари (HgS), в рудах в небольших количествах обнаружены пирит (FeS_2), марказит (FeS_2), бертьерит ($FeSb_2S_4$), галенит (PbS), сфалерит (ZnS), халькопирит ($CuFeS_2$), борнит (Cu_5FeS_4), метациннабарит (HgS), арсенопирит (FeAsS), реальгар (As_4S_4) и аурипигмент (As_2S_3). Эти минералы обычно ассоциируются с основными рудообразующими минералами [9].

Среди жильных минералов распространены кварц и карбонаты (кальцит, доломит, анкерит). Ранний метасоматический кварц встречается в обломках брекчий и сланцах, а более поздний крупнозернистый кварц цементирует брекчии. Карбонаты сосредоточены в лежачем боку рудоносной зоны и связаны с гидротермально-метасоматическими процессами. Редко встречаются каолин, диккит, монтмориллонит, а также барит и флюорит в зонах крутопадающих разрывов. В приповерхностных участках развиты окисные минералы сурьмы (валентинит, сенармонтит) и железа (гематит) [10–12].

Формирование руд происходило в два этапа. Первый этап включал метасоматическое замещение пород кварцем в зоне контакта известняков и терригенных пород, сопровождавшееся образованием кальцита и

микробрекчий, а также интенсивными дислокациями на границе с вышележащими породами. Процессы древнего карстообразования между этапами указывают на длительный перерыв в рудообразовании [13].

На втором этапе сначала формировались кварц-флюоритовые брекчии в зонах крутопадающих разрывов, затем происходило отложение антимонита и киновари с подчиненным количеством жильных минералов. Заключительная стадия характеризуется развитием реальгар-аурипигментовой минерализации, связанной с кварцем или кальцитом [9, 14].

Геологическая обстановка и характер минералообразования свидетельствуют о небольших глубинах и низких температурах формирования руд. По мнению В. И. Смирнова, отложение минералов происходило из коллоидных растворов вследствие нейтрализации и резкого снижения щелочности [5].

В природных условиях золото и серебро часто обнаруживаются совместно с сурьмой, выступая в качестве изоморфных примесей в ее минералах, особенно в стибните [8]. Стибнит (Sb_2S_3), являющийся основным минералом сурьмы, нередко содержит небольшие количества благородных металлов, которые замещают сурьму в кристаллической решетке. Такое изоморфное замещение обусловлено сходными ионными радиусами и химическими свойствами элементов [15].

При промышленном производстве сурьмы, особенно в процессе огневого рафинирования, значительная часть присутствующих в сырье золота и серебра переходит в очищенный металл [16]. Огневое рафинирование предполагает переплавку сурьмяного сырья при высоких температурах, в ходе которой примеси удаляются в виде шлака или газа. Благодаря высокой химической стойкости и высоким температурам кипения, 90–95% золота и серебра сохраняются в металлической фазе, обогащая таким образом рафинированную сурьму благородными металлами [17].

Товарными концентратами благородных металлов, получаемыми в ходе переработки сурьмяных руд, являются анодные шламы и свинцовые остатки. Анодные шламы образуются при электролитическом рафинировании сурьмы, где благородные металлы, не поддающиеся растворению, оседают на дне электролитической ванны. Свинцовые остатки возникают при возгонке оксида сурьмы (III), методе, основанном на термическом разложении сурьмяных соединений с последующей конденсацией оксида сурьмы. В процессе возгонки менее летучие компоненты, включая золото и серебро, остаются в твердых остатках, которые затем могут быть переработаны для извлечения благородных металлов [18].

Возгоночный метод получения оксида сурьмы (III) играет важную роль в металлургии сурьмы [16]. Он позволяет эффективно отделять сурьму от примесей и получать высокочистый оксид сурьмы, используемый в производстве огнеупоров, красителей и других материалов. При этом побочные продукты, содержащие благородные металлы, представляют значительную экономическую ценность. Их последующая переработка и аффинаж позволяют извлекать золото и серебро, повышая общую рентабельность производства.

Наличие золота и серебра в сурьмяных рудах оказывает влияние на выбор технологий переработки и обогащения. Современные методы анализа и обогащения позволяют более точно определять содержание благородных металлов и разрабатывать оптимальные схемы их извлечения. Это способствует комплексному использованию сырья и уменьшению потерь ценных компонентов [18].

В Иркутском институте редких и цветных металлов был разработан комплекс общих принципов и рекомендаций, посвященных проблеме рационального использования руд, содержащих золото и сурьму. Эти исследования имеют особое значение, поскольку золото и сурьма являются металлами с весьма высокой абсолютной ценностью и широким спектром применения в различных отраслях промышленности. Высокая стоимость этих металлов делает технологически необходимым и экономически целесообразным их извлечение даже при относительно низких содержаниях в исходном сырье [19].

Золото в таких рудах непосредственно связано с минералами сурьмы, особенно с антимонитом (стибнитом), где оно присутствует в виде средних по величине, тонких или субмикроскопических включений металлического золота. Кроме того, золото может быть ассоциировано с некоторыми золотосодержащими сульфидами, такими как пирит. Такое сложное минеральное строение руд создает определенные трудности при их переработке, требуя разработки специальных технологических схем обогащения и металлургической переработки [16, 19].

В этом случае рекомендуется использовать схемы обработки, предусматривающие получение коллективного золотосурьмяного концентрата и отвальных хвостов обогащения. Коллективный концентрат позволяет эффективно собрать оба ценных компонента – золото и сурьму – в одном продукте, что оптимизирует процесс дальнейшей переработки. Отвальные хвосты, содержащие незначительные количества ценных металлов, могут быть либо

утилизированы, либо подвергнуты дополнительной обработке при наличии экономической целесообразности [20–22].

Разделение золота и сурьмы должно осуществляться на стадии металлургической переработки полученного концентрата. Это может быть достигнуто посредством различных методов, включая гидрометаллургические и пирометаллургические процессы. Выбор конкретного метода зависит от состава концентрата, требований к чистоте конечных продуктов и экономических соображений. Металлургическая переработка позволяет получить золото и сурьму в формах, пригодных для использования в промышленности или для дальнейшего рафинирования [16].

Важно отметить, что рациональное использование таких руд способствует не только эффективному использованию природных ресурсов, но и снижению экологической нагрузки за счет уменьшения объемов отходов.

Подавляющее большинство золотосодержащих руд характеризуется значительным содержанием тонковкрапленного золота. Тонкое вкрапление золота в минералах осложняет процессы его извлечения, поэтому требуется особый подход к измельчению руды. Измельчение проводится в одну, две или три стадии, реже в четыре, с возможным доизмельчением различных золотосодержащих продуктов. Многостадийное измельчение способствует полному раскрытию золотосодержащих минералов, что повышает эффективность последующих процессов обогащения и извлечения золота.

Методика проведения исследования

Исследование проводилось на образцах руды нижних горизонтов Джижикрутского месторождения. Первоначально руда подвергалась комплексной подготовке, включающей дробление, грохочение и измельчение до степени, при которой 75,8% материала имело крупность -0,063 мм. Полученная измельченная проба направлялась на химический анализ для определения содержания сурьмы, ртути, золота и сопутствующих элементов. Ситовым анализом определяли распределение ценных компонентов по классам крупности, что позволило оптимизировать последующие технологические операции.

На основе полученных данных проводились флотационные испытания по упрощенной технологической схеме, включающей основную и две контрольные флотации. Оптимизировались условия флотации, такие как время измельчения, расход реагентов (азотнокислый свинец как активатор и бутиловый ксантогенат как собиратель), а также режимы флотации. Флотационные концентраты подвергались последовательным перечисткам для повышения качества и содержания ценных компонентов.

Экспериментальная часть

В рамках подготовки пробы для исследования исходная руда была подвергнута комплексному процессу, включающему дробление, грохочение и измельчение. Дробление позволяет уменьшить

Таблица 1. Результаты химического состава руды
Table 1. Results of the chemical composition of the ore

Категория	***Компонент***	***Содержание***
Тяжелые металлы (%)	Сурьма (Sb)	3,7%
	Ртуть (Hg)	0,41%
Ценные металлы (г/т)	Золото (Au)	2,3 г/т
	Таллий (Tl)	31 г/т
Селеноиды (г/т)	Селен (Se)	12 г/т
	Теллур (Te)	13 г/т

Таблица 2. Гранулометрический состав руды по ситам
Table 2. Granulometric composition of ore by sieves

Класс, мм	Выход		Содер-жание Sb, %	Распределение по классам Sb, %	Распределение по классам суммарное Sb, %
	г	%			
-2,0+1,0	34,6	34,6	2,38	24,7	24,7
-1,0+0,63	16,7	51,3	3,12	15,6	40,3
-0,63+0,315	19,2	70,5	2,98	17,1	57,4
-0,315+0,125	10,7	81,2	4,5	14,4	71,8
-0,125+0,063	6,2	87,4	4,2	1,8	73,6
-0,063	12,6	100	7,0	26,4	100
∑	100		3,48	100	

размеры крупных кусков руды, грохочение – отделить материал по крупности, а измельчение – достичь необходимой степени измельчения для последующего анализа. Полученная измельченная средняя проба была направлена на химический анализ, результаты которого представлены в Таблице 1.

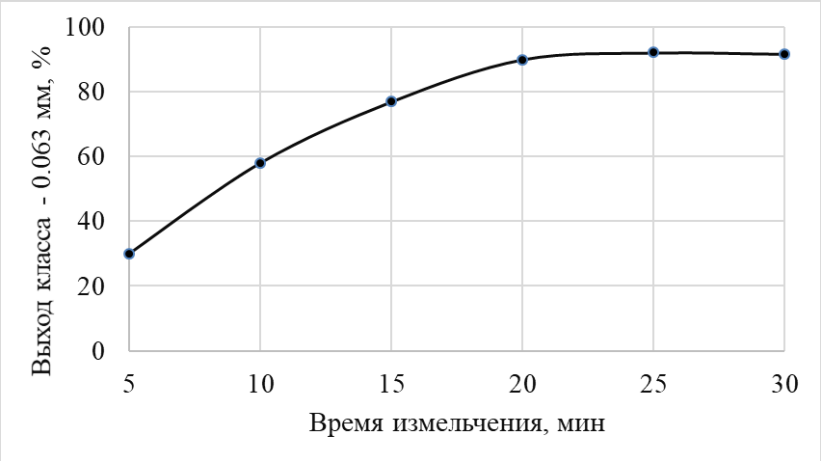

Рис. 1. График зависимости степени измельчения руды от длительности процесса измельчения
Fig. 1. Graph of the dependence of the degree of ore crushing on the duration of the grinding process

По результатам химического анализа можно сделать вывод, что руда нижних горизонтов Джижикрутского месторождения относится к золотосодержащим ртутно-сурьмяным рудам. Это означает, что наряду с золотом в руде присутствуют значительные количества ртути и сурьмы, что влияет на выбор технологических процессов переработки. Наличие этих элементов требует применения специальных методов для их эффективного извлечения и предотвращения возможного негативного воздействия на окружающую среду.

Кроме основных компонентов, в руде обнаружены сопутствующие элементы, представляющие определенный интерес с точки зрения их потенциального использования. В частности, такие металлы и неметаллы, как селен, теллур и таллий, могут быть извлечены в процессе переработки руды и использоваться в различных отраслях промышленности [23]. Селен и теллур востребованы в электронной промышленности, производстве сплавов и солнечных батарей, а таллий применяется в медицине и оптических приборах.

Учитывая сложный минеральный состав руды и присутствие ценных сопутствующих элементов, переработка должна быть тщательно спланирована. Комбинированные технологические схемы позволяют максимально эффективно извлечь не только золото, сурьму и ртуть, но и сопутствующие ценные элементы [24]. Это способствует повышению экономической эффективности разработки месторождения и рациональному использованию минеральных ресурсов.

Для детального изучения распределения полезных компонентов по различным классам крупности, руда, подготовленная для технологических исследований, была подвергнута ситовому анализу, результаты которого представлены в Таблице 2. Ситовой анализ является важным этапом в технологических исследованиях, так как позволяет определить гранулометрический состав руды и установить, в каких именно фракциях концентрируются ценные минералы.

Анализируя данные таблицы, можно отметить, что наибольший выход приходится на крупный класс «2,0+1,0 мм», который составляет 34,6% от общей массы образца. Однако, несмотря на высокий выход этой крупной фракции, сурьма преимущественно обогащена в более мелких классах крупности. В частности, в классе менее 0,063 мм содержание сурьмы достигает 7,0%, и именно в этой мелкой фракции сосредоточено 26,4% общего количества металла. Это свидетельствует о необходимости особого внимания к обработке мелких классов при разработке технологических процессов, направленных на эффективное извлечение сурьмы из руды.

Перед началом основных исследований была проведена серия предварительных опытов, направленных на изучение измельчаемости руды [25,26]. Эти эксперименты позволили определить оптимальные условия и параметры процесса измельчения, что является ключевым этапом в подготовке руды к последующей переработке. Полученные результаты испытаний, представленные на Рис. 1, предоставляют важную информацию о физических свойствах руды и ее поведении при механическом воздействии, что позволяет более точно

спланировать дальнейшие технологические операции.

В целях проведения дальнейших исследований было установлено время измельчения руды, равное 15 минутам. Это решение позволило достичь степени измельчения, при которой 75,8% материала составляет класс крупности -0,063 мм. Такой показатель соответствует тонкости помола, близкой к использующейся на фабрике ООО СП «Анзоб», что важно для сопоставимости результатов и обеспечения корректности экспериментальных данных.

Подготовительные исследования по флотации проводились по упрощенной технологической схеме, включающей основную и контрольную флотацию. Каждая стадия флотации длилась по 10 минут, что обеспечивало достаточное время для взаимодействия реагентов с минералами руды. После завершения обеих стадий флотации полученные концентраты объединялись, что способствовало увеличению общего выхода ценных компонентов. В процессе флотации использовались следующие реагенты: азотнокислый свинец в количестве 175 г/т в качестве активатора, бутиловый ксантогенат в качестве собирателя с расходом от 150 до 300 г/т, и вспениватель Т-80 для образования устойчивой пены.

Однако результаты показали, что данный технологический режим не обеспечивает эффективного извлечения ценных минералов из исследуемой руды. В связи с этим было принято решение скорректировать параметры процесса. В последующих экспериментах расход бутилового ксантогената был установлен на уровне 300 г/т для усиления собирательной способности реагента. Расход азотнокислого свинца, играющего ключевую роль в активации поверхности минералов, варьировался в более широком диапазоне от 175 до 750 г/т. В результате оптимальным расходом азотнокислого свинца был определен диапазон 350–500 г/т, при котором достигалась максимальная эффективность флотации.

Проведенные исследования подчеркнули важность тщательной настройки технологических параметров при переработке сложных руд. Правильный выбор времени измельчения и оптимальных расходов реагентов позволяет значительно повысить эффективность процесса обогащения и обеспечить более полное извлечение ценных компонентов, что имеет большое значение для промышленной эксплуатации месторождения.

Для определения оптимальных условий извлечения сурьмы методом флотации было проведено исследование влияния времени флотации на эффективность процесса. Эксперименты включали серии опытов с использованием одной и двух контрольных флотаций. В частности, время проведения второй контрольной флотации изменялось и составляло 10 и 15 минут соответственно.

Результаты показали, что введение второй контрольной флотации продолжительностью 15 минут значительно снижает содержание сурьмы в хвостах. Это свидетельствует о том, что увеличение времени флотации способствует более полному извлечению сурьмы из руды. Учитывая эти данные, в дальнейших исследованиях было решено применять две контрольные флотации: первая с продолжительностью 10 минут, вторая – 15 минут. Объединение концентратов, полученных после первой и второй контрольных флотаций, позволило повысить общую эффективность процесса и улучшить показатели извлечения сурьмы.

На основе полученных результатов и для более точного воспроизведения процесса флотации в условиях непрерывного (замкнутого) цикла были проведены дополнительные опыты на четырех навесках руды. В этих экспериментах расход ксантогената, служащего в качестве флотационного реагента-коллектора, был установлен на уровне 300 г/т. Расход азотнокислого свинца, выполняющего роль активатора флотации, составлял 500 г/т.

Следует отметить, что количество азотнокислого свинца, вводимого в основную флотацию, было увеличено до 350 г/т. Это изменение, вероятно, связано с необходимостью усиления активации минералов сурьмы для повышения эффективности их извлечения. В первой контрольной флотации расход активатора составил 100 г/т, а во второй — 50 г/т, что позволяет оптимизировать процесс активации на различных стадиях флотации.

Полученный флотационный концентрат подвергался двум последовательным перечисткам. Эти дополнительные этапы обработки направлены на повышение качества концентрата за счет удаления примесей и улучшения показателей содержания сурьмы. Перечистки позволяют достичь более высокой степени концентрации полезного компонента, что важно для последующих технологических процессов и экономической эффективности производства.

Результаты проведенных опытов, включая показатели выхода концентратов, степень извлечения сурьмы и другие технологические параметры, представлены в Таблицах 3. Анализ этих данных предоставляет ценную информацию для оптимизации технологической схемы флотации и позволяет сделать выводы о наиболее эффективных режимах работы.

В результате проведенных исследований удалось получить сурьмяный концентрат,

соответствующий требованиям марки КСуФ-3 [27]. Этот концентрат характеризуется высоким содержанием сурьмы – 46,5%, а извлечение сурьмы в него составило 89,9%. Такие показатели свидетельствуют о высокой эффективности технологического процесса обогащения сурьмы из исходной руды. Высокая концентрация сурьмы в конечном продукте делает его пригодным для последующей металлургической переработки и использования в различных отраслях промышленности.

Кроме сурьмы, в концентрат также успешно извлекаются другие ценные компоненты. Ртуть, присутствующая в руде, извлекается в сурьмяный концентрат с эффективностью 96,3%, при этом ее содержание в концентрате достигает 4,12%. Это особенно важно, учитывая токсичность ртути и необходимость ее контролируемого удаления и переработки. Высокое извлечение ртути позволяет не только обезвредить потенциально опасные отходы, но и получить дополнительный ценный продукт для промышленного использования.

Сопутствующие элементы, такие как таллий, селен и теллур, также присутствуют в концентрате в значительных количествах. Содержание таллия в концентрате составляет 257,8 г/т, и он извлекается с эффективностью 62,3%. Таллий является редким и ценным металлом, используемым в электронике и оптике, поэтому его извлечение может повысить экономическую эффективность переработки руды. Селен, содержание которого в концентрате составляет 108 г/т, извлекается с эффективностью 58%. Селен востребован в металлургии, стекольной промышленности и производстве полупроводников. Теллур извлекается в концентрат в меньшей степени — с эффективностью 32%, и его содержание в концентрате составляет 55 г/т. Несмотря на более низкое извлечение, присутствие теллура в концентрате открывает возможности для его последующего извлечения и использования в производстве термоэлектрических материалов и

Таблица 3. Флотационные показатели золото-сурьмяно-ртутной руды в закрытом цикле
Table 3. Flotation parameters of gold-antimony-mercury ore in a closed cycle

Наименование продуктов	Выход		Содержание			Извлечение		
	г	%	Sb, %	Hg, %	Au г/т	Sb, %	Hg, %	Au г/т
Концентрат 1	11,0	1,0	57,0	4,6		14,7	14,6	
Концентрат 2	11,7	1,28	47,0	3,7		15,6	15,0	
Концентрат 3	13,9	1,30	43,0	3,3	ср,10	14,5	13,6	
Концентрат 4	12,8	1,39	39,0	4,9		14,0	21,6	20,2
Промеж. продукт 1 контрольной флотации	48,3	4,95	6,4	0,61	5	8,2	9,6	9,6
Промеж. продукт 2 контрольной флотации	16,2	1,54	1,2	0,31	2	0,5	1,5	1,2
Промеж. продукт 1 перечистки	81,8	8,33	6,2	0,70	4	13,4	18,4	12,9
Промеж. продукт 1 перечистки	28,3	2,73	16,5	0,38	6	11,6	3,3	6,4
Хвосты	171,3	17,12	0,4	0,01	1,6	1,8	0,5	10,6
Хвосты	208,6	21,08	0,3	0,01	1,6	1,6	0,7	13,1
Хвосты	198,2	19,93	0,4	0,01	1,7	2,1	0,6	13,2
Хвосты	192,4	19,35	0,4	0,01	1,7	2,0	0,6	12,8
Исходная руда	994,5	100	3,56	0,31	2,4	100	100	100
Концентрат	49,4	6,02	46,5	4,12	10	89,9	96,3	28,6
Хвосты	770,5	93,98	0,37	0,01	1,6	11,1	3,7	71,4
Руда	819,9	100	3,1	0,26	2,1	100	100	100

сплавов.

Однако основная часть золота, содержащегося в руде, не обогащается в сурьмяном концентрате и остается в хвостах флотации. Содержание золота в хвостах флотации составляет 1,6 г/т. Это указывает на необходимость разработки дополнительных технологических процессов для эффективного извлечения золота из хвостов. Возможным решением может быть применение гравитационных методов обогащения или цианидного выщелачивания, что позволит повысить общий коэффициент извлечения золота и увеличить рентабельность переработки руды.

Исходя из полученных результатов, была разработана рекомендуемая технологическая схема флотации для переработки руды нижних горизонтов Джижикрутского месторождения, адаптированная для условий Анзобской обогатительной фабрики. Эта схема, представленная на Рис. 2, предусматривает комплексный подход к обогащению руды. Вначале руда подвергается тонкому измельчению до крупности, при которой 75% материала проходит через сито с размером ячейки 0,063 мм. Такое тонкое измельчение необходимо для максимального раскрытия минералов и повышения эффективности последующей флотации.

После измельчения проводится основная флотация, целью которой является отделение ценных минералов от пустой породы. Затем следуют две контрольные флотации, предназначенные для повышения качества концентрата и удаления оставшихся примесей. Финальный этап включает в себя перечистку концентрата, которая может проводиться два или три раза в зависимости от требуемого качества конечного продукта. Многоступенчатая система перечисток позволяет добиться высокой степени чистоты сурьмяного концентрата и эффективного извлечения сопутствующих ценных элементов.

Такая технологическая схема обеспечивает оптимальное использование минерального сырья и позволяет извлечь максимальное количество ценных компонентов из руды. Кроме того, она учитывает специфические особенности минерального состава руды нижних горизонтов Джижикрутского месторождения, включая

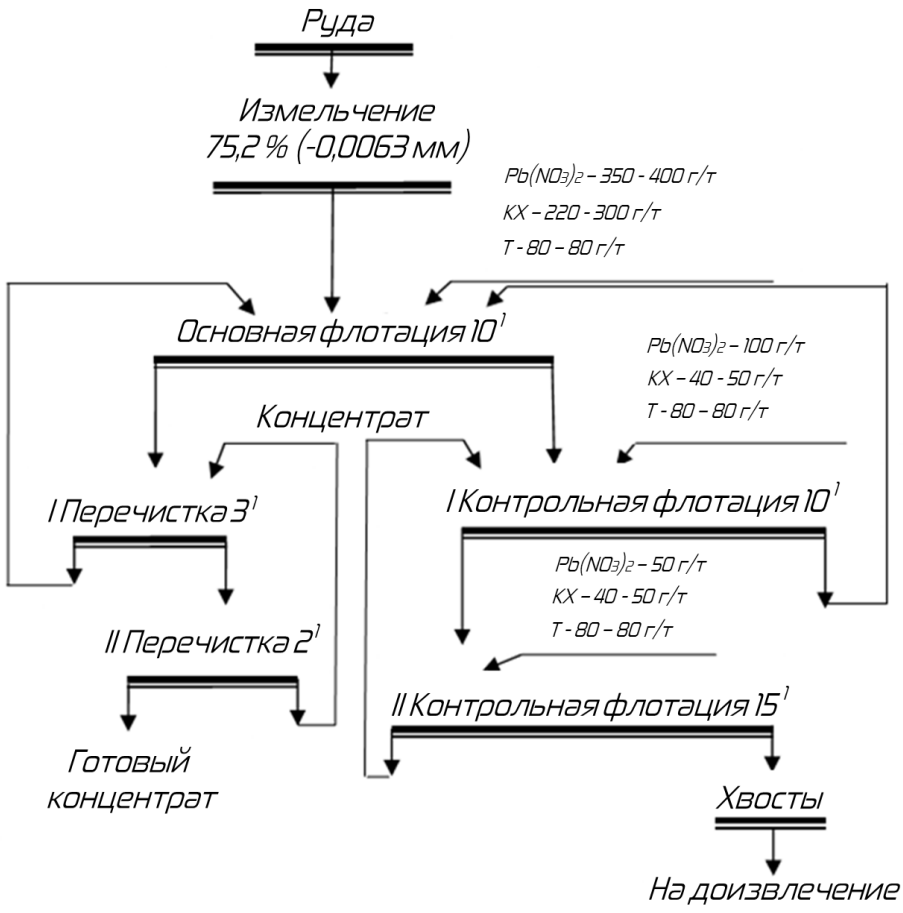

Рис. 2. Рекомендованная схема флотационного процесса для руды нижних горизонтов Джижикрутского месторождения

Fig. 2. Recommended flotation process scheme for the ore of the lower horizons of the Dzhizhikrut deposit

распределение сурьмы, ртути, таллия, селена, теллура и золота.

Несмотря на то, что предложенная технологическая схема успешно позволяет извлекать сурьму и сопутствующие ценные элементы, она не обеспечивает удовлетворительного извлечения золота из руды. Это указывает на необходимость проведения дальнейших исследований, направленных на разработку эффективных методов доизвлечения золота из хвостов контрольной флотации. Такие исследования могут включать оптимизацию существующих процессов, внедрение новых технологий обогащения или комбинирование различных методов переработки. Разработка улучшенной технологии извлечения золота не только повысит общую эффективность переработки руды, но и существенно увеличит экономическую выгоду предприятия, максимально используя все ценные компоненты минерального сырья.

Заключение

В результате проведенных исследований месторождения Джижикрут было установлено, что уникальная геологическая структура и сложный минералогический состав рудных тел требуют специализированного подхода к их переработке. Применение флотационного метода позволило эффективно извлечь сурьму и ртуть, получив сурьмяный концентрат марки КСуФ-3 с высоким содержанием сурьмы (46,5%) и высокой степенью извлечения (89,9%). Дополнительно выявлено присутствие ценных сопутствующих элементов, таких как таллий, селен и теллур, что открывает дополнительные возможности для повышения экономической эффективности переработки руды. Однако значительная часть золота остается в хвостах флотации, что указывает на необходимость разработки и внедрения дополнительных технологических процессов для его полного извлечения.

Предложенная технологическая схема флотации демонстрирует оптимальное использование минерального сырья и максимальное извлечение основных ценных компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вазиров К. В. Некоторые особенности образования и размещения ртутно-сурьмяных и комплексных сурьмусодержащих месторождений Центрального Таджикистана и Памира // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. 2013. № 1–2. С. 274–279.

2. Холов Х. И., Самихов Ш. Р., Ниезов А. С. Характеристика геологии, минералогический и химический состав руд месторождения Джижикрута // Евразийское Научное Объединение. 2018. № 12–6. С. 413–416.

3. Борисенко А. С., Чанг Ч. Х., Изох А. Э., Дашкевич Е. Г., Неволько П. А. Минералого-геохимические особенности руд и возраст Au-As оруденения Северного Вьетнама // Металлогения древних и современных океанов. 2008. № 1. С. 218–221.

4. Сидоренко З. В. Ртутно-сурьмяное месторождение Джижикрут в Таджикистане // Советская геология. 1948. № 34. С. 60–66.

5. Вазиров К. В., Малахов Ф. А. О роли метасоматитов в процессе образования сурьмяно-ртутных и комплексных сурьмусодержащих месторождений Зеравшано-Гиссарского рудного пояса (Южный Тянь-Шань) // Уральская минералогическая школа. 2013. № 19. С. 28–33.

6. Каюмов Ш. А., Мамарахимов М. М. Перспективные месторождения полезных ископаемых Республики Таджикистан // Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем *XXI века.* 2019. № 13. С. 252–256.

7. Файзиев А. Р., Файзиев Ф. А. Серебро-сурьмяный рудно-формационный тип оруденения в Таджикистане // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2015. Т. 58, № 5. С. 413–417.

8. Васильев В. Г. Сурьмяные месторождения // Месторождения Забайкалья. 1995. 67 с.

9. Новикова Т. И. Окисные минералы сурьмы Джижикрутского ртутно-сурьмяного месторождения // Известия АН Тадж. ССР, отд. ест. наук. 1958. № 2. С. 13–27.

10. Шамшиев О. Ш., Ждан А. В., Толобаева Н. Т. Геологические особенности некоторых золоторудных месторождений Южного Тянь-Шаня // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2014. С. 158–159.

11. Анисимова Г. С., Мустафин С. К. Сурьма: Сырьевая база, новые перспективные типы и качества комплексных руд // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. 2019. С. 16–18.

12. Скобельцин Е. В. Особенности геологического строения Нарин-Кундуйского месторождения сурьмяных руд (Юго-Западное Забайкалье) // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов. 2019. С. 104–108.

13. Мамадвафоев М. М., Бригинский А. А. Геология и перспективы золотоносности месторождения Табаспин (Центральный Таджикистан) // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2013. Т. 56. № 5. С. 405–409.

14. Вазиров К. В. Особенности положения Кончочского рудного поля в региональных тектонических структурах Зеравшано-Гиссарского сурьмяно-ртутного пояса как фактор его многокомпонентности // Доклады Академии наук

Республики Таджикистан. 2007. Т. 50, № 2. С. 151–159.

15. Гусев А. И. Типизация золото-ртутного оруденения Горного Алтая // Успехи современного естествознания. 2012. № 12. С. 87–91.

16. Ысманов Э. М., Абдалиев У. К., Ташполотов Ы. Рафинирование сурьмы // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2016. № 7. С. 29–31.

17. Саломатова С. И., Матвеев А. И. Результаты технологических исследований золото-сурьмяной руды месторождения «Сентачан» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. Т. 15. № 12. С. 84–91.

18. Вяткин В. Н., Козлов П. А., Ивакин Д. А. Разработка технологии извлечения цинка, олова и свинца из вторичного техногенного сырья // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 9. С. 17–19.

19. Соложенкин П. М. Феррохлоридное выщелачивание сульфидов сурьмы и электролиз пульпы // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 2. С. 253–260.

20. Самихов Ш. Р., Холов Х. И., Зинченко З. А. Технология обогащения руд нижних горизонтов Джижикрутского месторождения // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2017. Т. 60, № 10. С. 533–538.

21. Маслобоева С. М., Соложенкин П. М. Разработка технологии извлечения сурьмы и золота из сурьмянистиго золотосодержащего сплава // Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения-2012). 2012. С. 335–338.

22. Дистанов Э. Г., Стеблева А. Т., Оболенский А. А., Кочеткова К. В., Борисенко А. С. Генезис Удерейского золото-сурьмяного месторождения в Енисейском кряже // Геология и геофизика. 1975. Т. 8. С. 19–27.

23. Черкасова Т. Г., Черкасова Е. В., Тихомирова А. В., Пилин М. О., Баранцев Д. А. Анализ отходов угледобычи, углепереработки и углеобогащения месторождений Кузнецкого угольного бассейна // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 6 (154). С. 59–66.

24. Федоров А. А., Сясько А. А., Редлих Э. Ф. Инженерно-геологическое обоснование технологических схем при проектировании хвостохранилища Нежданинской золотоизвлекательной фабрики // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 4 (116). С. 9–18.

25. Соложенкин П. М., Бондаренко Е. В., Чертогова Е. В. Обогащение сурьмяных руд Забайкалья // Обогащение руд. 2008. № 1. С. 15–19.

26. Балтухаев Г. И., Соложенкин П. М. Обогащение золотосурьмяных руд республики Саха (Якутия) // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2009. № 3. С. 12–17.

27. Павленко Ю. В., Поляков О. А. Влияние свойств джаспероидного формационного типа антимонит-кварцевых руд на эффективность рудоподготовки // Вестник Забайкальского государственного университета. 2012. № 3. С. 19–34.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Холов Холмахмад Исроилович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт химии имени В. И. Никитина НАН Таджикистана (Республика Таджикистан, 734063, г. Душанбе, ул. Айни 299/2), e-mail: Kholmahmad90@mail.ru, www.ikai.tj

Самихов Шонавруз Рахимович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт химии имени В. И. Никитина НАН Таджикистана (Республика Таджикистан, 734063, г. Душанбе, ул. Айни 299/2), e-mail: samikhov72@mail.ru, www.ikai.tj

Курбонов Шодком Ахмадбоевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт химии имени В. И. Никитина НАН Таджикистана (Республика Таджикистан, 734063, г. Душанбе, ул. Айни 299/2), e-mail: Shodkom__1990@mail.ru, www.ikai.tj

Заявленный вклад авторов:

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

Самихов Шонавруз Рахимович – исполнитель экспериментальных работ, анализ полученных результатов по геологии и минералогии, непосредственное руководство экспериментальными исследованиями.

Курбонов Шодком Ахмадбоевич – обработка результатов исследований с применением программ Microsoft Excel.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

FEATURES OF THE GEOLOGY AND BENEFICIATION TECHNOLOGY OF GOLD-ANTIMONY-MERCURY ORES OF THE DJIZHIKRUT DEPOSIT

Kholov Kholmakhmad Isroilovich [1, 2] *,
Samikhov Shonavruz Rakhimovich [1],
Kurbanov Shodkom Akhmadboevich [1]

[1] V.I. Nikitin Institute of Chemistry, Academy of sciences of the Republic of Tajikistan
[2] Tajik State Pedagogical University named after Sadriddin Ayni

* for correspondence: Kholmahmad90@mail.ru

Abstract.
The Dzhizhikrut deposit, located in the Zeravshan-Gissar antimony-mercury belt, is a unique jasperoid deposit characterized by distinctly expressed stockwork-like ore bodies and a complex multilayered structure that includes dolomite breccias. Studies on the beneficiation of ores from the lower horizons have demonstrated the possibility of effectively extracting antimony and mercury using flotation methods. As a result, an antimony concentrate of grade KSuF-3 was obtained, containing 46.5% antimony with a recovery rate of 89.9%. However, a significant portion of gold remains in the flotation tails, indicating the need to develop additional technological processes for its extraction.
In this work, a flotation technological scheme adapted to the conditions of the Anzob processing plant (Tajik-American LLC JV «Anzob») is proposed. The scheme includes fine grinding of the ore to 75% passing -0.063 mm, primary flotation, two control flotations, and multistage cleaning of the concentrate. This approach ensures optimal use of mineral raw materials and maximum recovery of antimony and mercury, as well as associated valuable elements such as thallium, selenium, and tellurium.
Special attention is given to the geological and mineralogical features of the deposit, which influence the choice of processing methods. The unique composition of the ores, characterized by a high content of finely disseminated gold and a complex association of antimony and mercury minerals, requires specialized beneficiation technologies. Despite the successful extraction of antimony and mercury, the gold remaining in the tails represents a potential reserve for increasing the economic efficiency of developing the deposit.
Thus, the conducted studies confirm the prospect of using the flotation method for the beneficiation of gold-antimony-mercury ores at the Dzhizhikrut deposit and underscore the necessity for further research on gold extraction from flotation tails..

CC BY

Article info
Received:
04 December 2024

Accepted for publication:
22 April 2025

Accepted:
30 April 2025

Published:
11 June 2025

Keywords: *Djizhikrut deposit, jasperoid type, antimony, mercury, flotation, stibnite, mineralization, technological scheme, gold-bearing ores, ore-bearing blocks, ore processing, associated elements.*

For citation: Kholov Kh.I., Samikhov Sh.R., Kurbanov Sh.A. Features of the geology and beneficiation technology of gold-antimony-mercury ores of the Djizhikrut deposit. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 2(168):175-187. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-175-187, EDN: RIMUUT

REFERENCES

1. Vazirov K.V. Some features of the formation and distribution of mercury-antimony and complex antimony-containing deposits in Central Tajikistan and the Pamirs. *Bulletin of the Tajik National University. Natural Sciences Series.* 2013;1–2:274–279.

2. Kholov H.I., Samikhov Sh.R., Niyozov A.S. Geological, mineralogical, and chemical composition of

the ores of the Dzhizhikrut deposit. *Eurasian Scientific Association*. 2018; 12–6:413–416.

3. Borisenko A.S., Chang Ch.H., Izokh A.E., Dashkevich E.G., Nevolko P.A. Mineralogical and geochemical characteristics of ores and the age of Au-As mineralization in Northern Vietnam. *Metallogeny of Ancient and Modern Oceans*. 2008; 1:18–221.

4. Sidorenko Z.V. Mercury-antimony deposit Dzhizhikrut in Tajikistan. *Soviet Geology*. 1948;34:60–66.

5. Vazirov K.V., Malakhov F.A. The role of metasomatites in the formation of antimony-mercury and complex antimony deposits in the Zeravshan-Gissar ore belt (Southern Tien Shan). *Ural Mineralogical School*. 2013; 19:28–33.

6. Kayumov Sh.A., Mamarakhimov, M.M. Promising mineral deposits of the Republic of Tajikistan. *Scientific and Educational Potential of Youth in Solving the Urgent Problems of the 21st Century*. 2019;13:252–256.

7. Faiziev A.R., Faiziev F.A. Silver-antimony ore-formational type of mineralization in Tajikistan. *Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*. 2015; 58:5:413–417.

8. Vasilyev V.G. Antimony Deposits. *Deposits of Transbaikalia*. 1995. 67 pp.

9. Novikova T.I. Oxide minerals of antimony in the Dzhizhikrut mercury-antimony deposit. *Proceedings of the Academy of Sciences of the Tajik SSR, Natural Sciences Section*. 1958; 2:13–27.

10. Shamshiev O.Sh., Zhdan A.V., Tolobayeva N.T. Geological characteristics of some gold deposits of the Southern Tien Shan. *Bulletin of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*. 2014. Pp. 158–159.

11. Anisimova G.S., Mustafin S.K. Antimony: Raw material base, new promising types, and quality of complex ores. *Geology and Mineral Resources of the North-East of Russia*. 2019. Pp. 16–18.

12. Skobeltsin E.V. Geological structure of the Naryn-Kunduy antimony ore deposit (South-Western Transbaikalia). *Kulagin Readings: Production Process Engineering and Technology*. 2019. Pp. 104–108.

13. Mamadvafoev M.M., Bruginsky A.A. Geology and gold-bearing potential of the Tabaspin deposit (Central Tajikistan). *Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*. 2013; 56(5):405–409.

14. Vazirov K.V. Structural position of the Konchoch ore field in the regional tectonic structures of the Zeravshan-Gissar antimony-mercury belt as a factor of its polycomponent nature. *Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*. 2007; 50(2):151–159.

15. Gusev A.I. Typology of gold-mercury mineralization in the Mountain Altai. *Advances in Modern Natural Science*. 2012; 12:87–91.

16. Ysmanov E.M., Abdaliev U.K., Tashpolotov Y. Refining of antimony. *Science, New Technologies and Innovations of Kyrgyzstan*. 2016; 7:29–31.

17. Salomatova S.I., Matveev A.I. Results of technological studies of gold-antimony ore of the "Sentachan" deposit. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2009; 15(12):84–91.

18. Vyatkin V.N., Kozlov P.A., Ivakin D.A. Development of a technology for extracting zinc, tin, and lead from secondary technogenic raw materials. *Ecology and Industry of Russia*. 2015; 19(9):17–19.

19. Sologenkin P.M. Ferrichloride leaching of antimony sulfides and electrolysis of pulp. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2011; 2:253–260.

20. Samikhov Sh.R., Kholov H.I., Zinchenko Z.A. Beneficiation technology of the lower horizons of the Dzhizhikrut deposit. *Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*. 2017; 60(10)533–538.

21. Masloboyeva S.M., Sologenkin P.M. Development of technology for extracting antimony and gold from antimony-gold alloy. *Modern Methods of Technological Mineralogy in the Processes of Comprehensive and Deep Processing of Mineral Resources (Plaksin Readings-2012)*. 2012. Pp. 335–338.

22. Distanov E.G., Stebleva A.T., Obolensky A.A., Kochetkova K.V., Borisenko A.S. Genesis of the Udereisky gold-antimony deposit in the Yenisei Ridge. *Geology and Geophysics*. 1975; 8:19–27.

23. Cherkasova T.G., Cherkasova E.V., Tikhomirova A.V., Pilin M.O., Barantsev D.A. Analysis of coal mining, coal processing, and beneficiation waste from the Kuznetsk coal basin deposits. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2022; 6(154):59–66.

24. Fedorov A.A., Syasko A.A., Redlich E.F. Engineering and geological justification of technological schemes for tailings dam design at the Nezhdaninsk gold extraction plant. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2016; 4(116):9–18.

25. Sologenkin P.M., Bondarenko E.V., Chertogova E.V. Beneficiation of antimony ores in Transbaikalia. *Beneficiation of Ores*. 2008; 1:15–19.

26. Baltukhaev G.I., Sologenkin P.M. Beneficiation of gold-antimony ores in the Republic of Sakha (Yakutia). *Proceedings of Higher Educational Institutions. Non-Ferrous Metallurgy*. 2009; 3:12–17.

27. Pavlenko Y.V., Polyakov O.A. Influence of the properties of the jasperoid formation type of stibnite-quartz ores on ore preparation efficiency. *Bulletin of the Transbaikal State University*. 2012; 3:19–34.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:
Kholmahmad I. Kholov, C. Sc. in Technical, Senior Researcher, V.I. Nikitin Institute of Chemistry, Academy of sciences of the Republic of Tajikistan (Republic of Tajikistan, 734063, Dushanbe, st. Ayni 299/2), e-mail: Kholmahmad90@mail.ru, www.ikai.tj
Shonavruz R. Rahimovich, Dr. Sc. in Technical, Leading Researcher, V.I. Nikitin Institute of Chemistry, Academy of sciences of the Republic of Tajikistan (Republic of Tajikistan, 734063, Dushanbe, st. Ayni 299/2), e-mail: samikhov72@mail.ru, www.ikai.tj
Shodkom A. Qurbonov, C. Sc. in Technical, Senior Researcher, V.I. Nikitin Institute of Chemistry, Academy of sciences of the Republic of Tajikistan (Republic of Tajikistan, 734063, Dushanbe, st. Ayni 299/2), e-mail: Shodkom__1990@mail.ru, www.ikai.tj

Contribution of the authors:
Kholmahmad I. Kholov – development of the research idea; analysis of the topic development, development of the technological scheme, formulation of conclusions, selection of bibliography, writing the text.
Shonavruz R. Rahimovich – is a performer of experimental works, analysis of the results obtained in geology and mineralogy, direct management of experimental research.
Shodkom A. Qurbonov – processing of research results using program Microsoft Excel.

All authors have read and approved the final manuscript.