



## Исследование и выбор оптимальной технологической схемы флотационного обогащения золото-медно-мышьяковистой руды месторождения «Тарор» (Республика Таджикистан)

© М.М. Солихов\*, А.В. Аксёнов\*\*, М.И. Каримов\*\*\*, Г.Г. Минеев\*\*, О.Б. Рахманов\*

\*ООО НИИПИ «ТОМС», г. Иркутск, Россия,

\*\*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия,

\*\*\*Горно-металлургический институт Таджикистана, г. Бустон, Таджикистан

**Резюме:** Цель – изучение влияния крупности материала на повышение эффективности флотационного обогащения золото-медно-мышьяковистых руд месторождения «Тарор» (Республика Таджикистан) и изучение зависимости извлечения золота от продолжительности процесса для выбора альтернативной технологической схемы переработки данной руды. По данным рентгенофазового анализа минеральный состав пробы руды месторождения «Тарор» на 92% представлен породообразующими минералами. Рудная минерализация представлена сульфидными минералами, главным образом арсенопиритом, халькопиритом и пиритом в суммарном количестве 8%. Рудообразующие элементы представлены по большей части железом, серой, мышьяком и медью. Массовая доля составляет, %, соответственно: железа – 6,02, серы – 3,26, мышьяка – 1,52, меди – 0,82. Содержание золота и серебра в руде составляет 7,35 г/т и 20,28 г/т. Степень окисления руды, рассчитанная по железу, составляет 51,3%. Данный показатель позволил характеризовать руду как смешанную, близкую к первичному типу. Результаты исследований по флотационному обогащению показали, что измельчение исходной руды до крупности 95% -71 мкм позволяет повысить извлечение золота в концентрате на 10% по сравнению с измельчением до крупности частиц 80% -71 мкм. Было изучено влияние продолжительности процесса флотации на извлечение золота. Для достижения максимального извлечения золота в черновой флотационный концентрат время основной флотации в дальнейших тестах целесообразно принять равным 14 мин, в контрольной флотации – 12 мин. По полученным экспериментальным данным при рекомендации флотационного обогащения изучаемой руды месторождения «Тарор» в качестве альтернативного технологического решения предлагается сравнительно стандартная схема, включающая основную, контрольную и пересчетную стадии флотации.

**Ключевые слова:** месторождение «Тарор», упорные золотосодержащие руды, золото, флотация, флотационное обогащение, рудная минерализация

**Для цитирования:** Солихов М.М., Аксёнов А.В., Каримов М.И., Минеев Г.Г., Рахманов О.Б. Исследование и выбор оптимальной технологической схемы флотационного обогащения золото-медно-мышьяковистой руды месторождения «Тарор» (Республика Таджикистан) // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 4. С. 498–508. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-498-508>

## An optimal technological scheme for flotation concentration of gold-copper-arsenic ores of the Taror deposit (Republic of Tajikistan)

Mirzobedil M. Solikhov\*, Aleksandr V. Aksenov\*\*, Murad I. Karimov\*\*\*,  
Gennadiy G. Mineev\*\*, Odilzhon B. Rakhmanov\*

\*Institute of Technologies of Mineral Separation (TOMS) LLC, Irkutsk, Russia,

\*\*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia,

\*\*\*Mining and Metallurgical Institute of Tajikistan, Buston, Tajikistan

**Abstract:** This article investigates the effect of material size on the efficiency of flotation concentration of gold-copper-arsenic ores of the Taror deposit (Republic of Tajikistan) and studies the dependence of gold recovery on the duration of the process with the purpose of developing an alternative technological scheme for processing this ore type. According to X-ray phase analysis, Taror ore samples consist of rock-forming minerals by 92%. Ore mineralization is represented by sulphide minerals, mainly arsenopyrite, chalcopyrite and pyrite, in the total amount of 8%. Ore-forming elements include iron, sulphur, arsenic and copper with the mass fraction of 6.02%, 3.26%, 1.52% and 0.82%, respectively. Gold and sil-

ver are contained in the ore in the amount of 7.35 g/t and 20.28 g/t, respectively. The oxidation state of the ore calculated by iron comprises 51.3%. According to this indicator, this ore type can be distinguished as mixed, close to the primary type. According to the conducted chemical phase analysis of gold, this ore type belongs to the category of refractory ores. Flotation concentration experiments showed that grinding the original ore to a size of 95%–71 microns increases the recovery of gold in the concentrate by 10%, compared to grinding to a particle size of 80%–71 microns. The effect of the flotation process duration on gold recovery was also studied. To achieve the maximum gold recovery in the flotation concentrate, the duration of the main flotation and control flotation should be taken equal to 14 and 12 minutes, respectively. As a result of the experiments, a relatively simple technological solution was proposed for flotation concentration of the Taror ore, which includes the main, control and cleaning stages of flotation.

**Keywords:** Taror deposit, refractory gold-bearing ores, gold, flotation, flotation concentration, ore mineralization

**For citation:** Solikhov MM, Aksenov AV, Karimov MI, Mineev GG, Rakhmanov OB. An optimal technological scheme for flotation concentration of gold-copper-arsenic ores of the Taror deposit (Republic of Tajikistan). *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):498-508. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-498-508>

## ВВЕДЕНИЕ

Добыча золота в Таджикистане в настоящее время осуществляется на ~ 40 месторождениях. Крупнейшие месторождения золота, где сосредоточены основные балансовые запасы, расположены в Центральной части Таджикистана, в Зеравшанской долине (Тарор, Джилау, Чоре, Дуоба).

Из перечисленных месторождений на территории Республики Таджикистан наибольшее значение имеет золоторудное месторождение «Тарор», которое по вещественному составу характеризуется большим разнообразием. Главной особенностью золотосодержащей руды данного месторождения является наличие сопутствующих примесных элементов – меди и мышьяка [1–5].

Золото-медно-мышьяковистая руда месторождения «Тарор» является наиболее тяжелым объектом (упорным) по отношению к традиционным способам извлечения золота. Переработка данной руды зачастую дает неудовлетворительные технико-экономические и экологические показатели: минералы меди, активно взаимодействуя с цианистыми растворами, являются причиной больших потерь цианида вследствие образования комплексных цианистых соединений меди. Мышьяксодержащий минерал – арсенипирит – является основным носителем

тонко-вкрапленного золота. Наличие золота в данной форме обуславливает низкие показатели извлечения: менее 80% при цианировании<sup>1</sup> [6–12].

В последние годы в мировой практике упорные золотосодержащие руды перерабатываются по разным комбинированным схемам, в том числе по флотационной и флотационно-цианистой схеме. Флотация играет достаточно важную роль при обогащении золоторудного сырья [13].

В настоящее время флотационным способом обогащения ежегодно перерабатывают более 2 млрд т полезных ископаемых, и этот факт является лучшей характеристикой данного технологического процесса.

Благоприятными объектами для использования флотации являются технологически упорные руды, золото в которых тесно ассоциировано с сульфидными минералами (пиритом, арсенипиритом, халькопиритом, галенитом, антимонитом и многими другими), и, как известно из литературных источников, такое золото не может быть извлечено цианированием без применения достаточно сложных и дорогостоящих подготовительных процессов: окислительного обжига, автоклавного, атмосферного или биохимического окисления сульфидов<sup>2,3</sup> [13–20], ультратонкого измельчения [15].

<sup>1</sup> Жучков И.А. Извлечение золота из упорных золотосодержащих руд: учеб. пособ. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. 88 с.

<sup>2</sup> Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых: учеб. В 2 т., т. 2; 4-е изд., стер. М.: Изд-во «Горная книга», 2017. 312 с.

<sup>3</sup> Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Абрютин Д.В. Технология переработки золотосодержащего сырья: учеб. пособ. М.: Изд-во «МИСиС», 2011. 328 с.

В настоящей работе с целью повышения извлечения ценного компонента (золота) и обеспечения приемлемой рентабельности переработки месторождения «Тарор» авторы провели лабораторные исследования по флотационному обогащению золотосодержащей руды месторождения «Тарор».

### ФОРМА НАХОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА И ЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ИСХОДНОЙ РУДЕ

В ходе изучения фазового анализа были определены формы нахождения золота, характера его взаимосвязи с рудными и порообразующими минералами в исходной руде месторождения «Тарор». Результаты анализа представлены в табл. 1.

Как видно из таблицы, доля свободного золота в исходной руде по крупности материала 95% класса -71 мкм находится на низком уровне и составляет 7,93%. Суммарное количество цианируемого золота – 76,63 %. На долю упорного, не извлекаемого прямым цианированием золота, приходится 23,37% от общей массы металла. Упорное золото распределяется на золото, содержащееся в сульфидах (18,22%), и нерастворимое в царской водке (5,15%).

По результату фазового анализа отмечено, что исходная руда месторождения «Тарор» является упорным сырьем по отношению к цианистому процессу. Извлечение золота цианированием составило 76,63%. Основными причинами технологической упорности исследуемого сырья является тонкая вкрапленность золота в сульфидах, как указывалось выше (18,22%), и наличие золота в кварце и минералах, нерастворимых в кислотах.

Таким образом, на основании фазового анализа золота сделан вывод о том, что данное сырье относится к категории труднообогатимых руд.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Флотационное обогащение исходной руды месторождения «Тарор» проводили с использованием достаточно простой схемы, включающей основную, контрольную и перемешивающую стадии флотации. Схема флотационного обогащения руды представлена на рис. 1.

Одним из факторов, влияющих на эффективность флотационного обогащения, является крупность материала. Учитывая тонкую вкрапленность сульфидных минералов, рекомендуемой крупностью материала для процесса флотационного обогащения на первой стадии экспериментов принята крупность 80–90% класса -71 мкм [18].

Исходную руду измельчали в шаровой мельнице до крупности 80% -71 мкм при следующих условиях: масса материала – 1 кг, масса мелющих тел (шары из низкоуглеродистой стали) – 7 кг, Т:Ж = 1:0,5.

Опыт проводили с навесками массой 1 кг в лабораторной флотомашине механического типа с объемом камеры 3 л, перемешивающая операция – в камерах объемом 0,75 л. Продолжительность флотации определяли визуально по степени нагруженности пены. По окончании процесса обогащения продукты высушивали, взвешивали и анализировали пробирным, атомно-абсорбционным и химическим методами анализа. В качестве собирателя использовали бутиловый ксантогенат калия (БКК) при расходе 200 г/т в основную и 100 г/т в контрольную операции, соответственно. В качестве вспенивателя применяли реагент Т-92 при расходе 130 г/т (основная флотация) и 60 г/т (контрольная флотация). Общая продолжительность флотации составила 40 мин (10 мин – основная, 10 мин – контрольная, 20 мин – перемешивающая флотация).

Таблица 1. Форма нахождения золота в руде  
Table 1. Form of gold occurrence in ore

Форма нахождения золота	Свободное золото	Золото в открытых сростках (цианируемые)	Тонковкрапленное в сульфидах (пирит, арсенопирит)	Золото в кварце и минералах, в нерастворимых кислотах	Всего
Содержание, г/т	0,57	4,94	1,31	0,37	7,19
Массовая доля, %	7,93	68,70	18,22	5,15	100

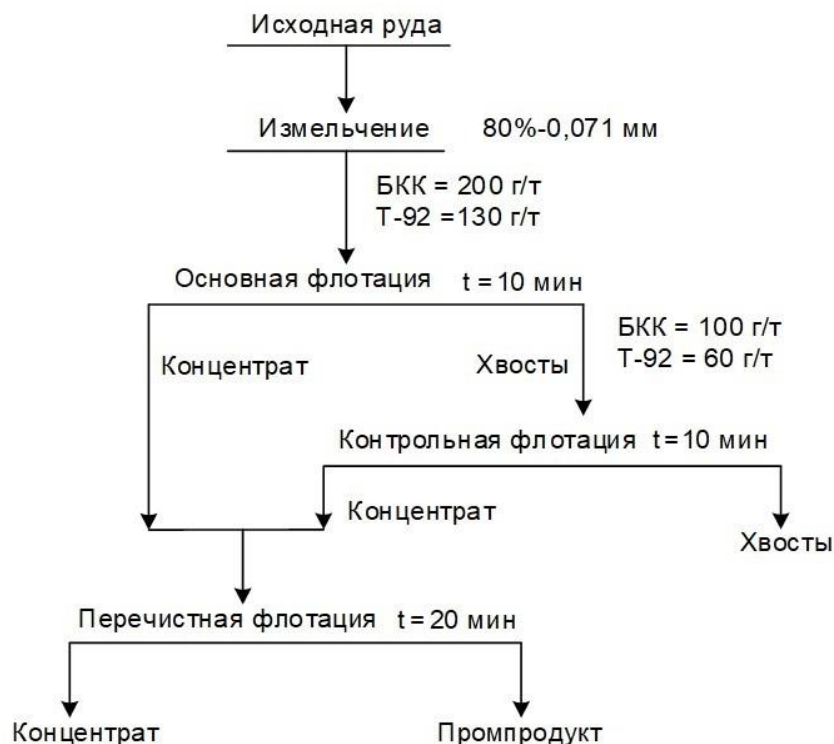


Рис. 1. Схема флотационного обогащения руды  
Fig.1. Diagram of ore flotation concentration

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты флотационного обогащения руды приведены в табл. 2.

Таким образом, в ходе флотационного обогащения руды получены следующие продукты: концентрат перечистой флотации с содержанием Au – 46,6 г/т, выход концентрата – 9,2%, промпродукт (хвосты перечистой флотации) с содержанием Au – 6,8 г/т, выход – 9,79%, отвальные хвосты флотации с содержанием Au – 2,6 г/т, выход хвостов – 81,01%.

В суммарном концентрате содержание

золота составило 26,09 г/т при извлечении 70,17% и выходе 18,99%. Химический состав продуктов флотации приведен в табл. 3.

Результаты, полученные при флотационном обогащении исходной руды при крупности измельчения 80% -71 мкм, не могут считаться удовлетворительными: невысокое извлечение Au (70,17%) при достаточно высоких потерях ценного компонента с хвостами (2,6 г/т). Одной из причин низкого извлечения золота является тонкая вкрапленность сульфидов в породобразующих минералах.

Таблица 2. Результаты флотационного обогащения пробы исходной руды месторождения «Тарор»

Table 2. Results of flotation concentration of the sample of original ore of the Taror deposit

Продукты обогащения	Выход, %	Содержание				Извлечение, %			
		Au, г/т	Fe, %	S, %	As, %	Au, %	Fe, %	S, %	As, %
Концентрат перечистой флотации	9,20	46,6	22,6	21,3	11,0	60,74	36,06	63,54	65,66
Промпродукт перечистой флотации	9,79	6,8	5,9	3,3	0,94	9,43	10,01	10,47	5,97
Суммарный концентрат флотации	18,99	26,09	13,99	12,02	5,81	70,17	46,04	74,01	71,63
Отвальные хвосты	81,01	2,6	3,84	0,99	0,54	29,83	53,93	25,99	28,37
Исходная руда	100	7,06	5,77	3,09	1,52	100	100	100	100

**Таблица 3.** Химический состав продуктов флотации  
**Table 3.** Chemical composition of flotation products

Элементы, компоненты	Массовая доля элемента, %	
	Концентрат перерешной флотации	Хвосты
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,52	5,14
CaO	3,77	11,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,3	5,49
MgO	7,60	11,9
MnO	0,042	0,093
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0,010	0,064
K <sub>2</sub> O	0,144	1,79
Na <sub>2</sub> O	<1,0	<1,0
TiO <sub>2</sub>	0,041	0,212
SiO <sub>2</sub>	15,3	39,2
As	11,0	0,54
Ba	0,0043	0,054
Bi	0,077	0,0050
Cd	0,043	0,0016
Cr	0,0010	0,0022
Co	0,0074	0,0007
Cu	7,14	0,150
Pb	0,015	0,0016
Sb	0,134	0,0052
Mo	0,0036	<0,0005
Ni	0,0022	0,0010
Sr	<0,0010	0,0078
Sn	0,0079	<0,0050
W	<0,0050	<0,0050
Zn	0,205	0,013
Au, г/т	46,6	2,6

С целью вскрытия зерна золотосодержащих минералов и достижения максимального извлечения золота в концентрат флотации в дальнейших исследованиях по флотационному обогащению предлагается измельчение исходной руды до крупности 95% -71 мкм.

Для выбора оптимальных режимов флотации были поставлены эксперименты по изучению кинетики флотации при крупности руды 95% -71 мкм. Изучение кинетики флотации минералов с целью повышения технологических показателей флотационного обогащения является одним из вариантов решения данной проблемы [20].

Схема проведения эксперимента по флотации представлена на рис. 2, результаты исследований приведены в табл. 4.

Для оценки результатов флотации в дан-

ном тесте было рассчитано значение критерия Хенкока, характеризующего эффективность протекания флотационного процесса, и построены графические зависимости этого показателя и извлечения золота от продолжительности флотации, приведенные на рис. 3.

Из графика (см. рис. 3) следует, что прирост извлечения золота в концентрат наблюдается в течение 18 мин, далее прирост извлечения металла замедляется. В этом же интервале времени достигается близкое к максимальному значение критерия эффективности обогащения. В оставшееся время процесс замедляется, извлечение нарастает плавно. Для достижения максимального извлечения золота в концентрат флотации продолжительность основной флотации в дальнейших тестах целесообразно принять равной 14 мин, в контрольной флотации – 12 мин.

По данным, полученным в результате исследований кинетики флотации исходной руды, следует, что по сравнению с предыдущим тестом золото достаточно эффективно флотируется при крупности 95% -71 мкм. Данные табл. 1 и 3 показывают, что извлечение золота в концентрат при крупности 80% -71 мкм составило 70,17%, а при крупности 95% -71 мкм повысилось на 13,67% и составило 83,84%.

Опираясь на полученные результаты, был проведен опыт по флотационному обогащению исходной руды крупностью 95% -71 мкм с последующим цианированием продуктов флотации.

С целью повышения содержания металла в концентрате и снижения выхода пенного продукта в схему введена перерешная операция. Для предотвращения гидрофобизации минералов при тонком измельчении и повышения избирательности (селективности) флотации при разделении минералов, обладающих близкими флотационными свойствами, был использован реагент-депрессор карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ). Продолжительность флотации была определена по результатам исследования кинетики флотации (см. табл. 3).

Схема флотационного обогащения руды представлена на рис. 4.



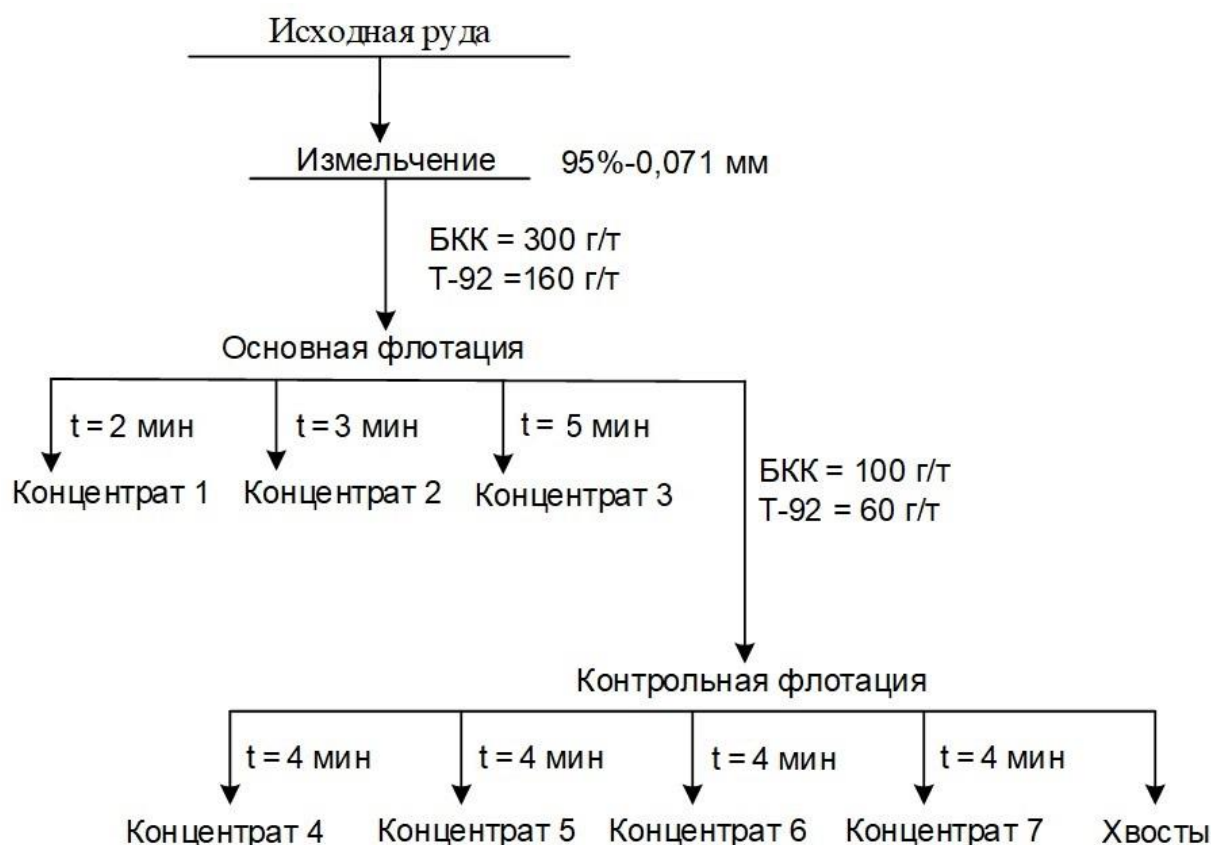


Рис. 2. Схема изучения кинетики флотации исходной руды  
Fig. 2. Diagram for original ore flotation kinetics study

Таблица 4. Результаты кинетики флотационного обогащения исходной руды  
Table 4. Results of original ore flotation concentration kinetics

№ п/п	Наименование продуктов	Продолжительность, мин	Масса, г	Выход, %	Содержание Au, г/т	Извлечение Au, %
1	Концентрат 1	2	31,5	3,23	52	22,78
2	Концентрат 2	3	33	3,38	30,3	13,91
3	Концентрат 3	5	40,5	4,15	18,8	10,59
4	Концентрат 4	4	88,5	9,08	20,7	25,48
5	Концентрат 5	4	42,5	4,36	9,8	5,79
6	Концентрат 6	4	33,5	3,44	6,9	3,22
7	Концентрат 7	4	26	2,67	5,7	2,06
Итого суммарный концентрат		26	295,5	30,31	20,40	83,84
8	Хвосты	–	679,5	69,69	1,71	16,16
Исходная руда			975	100,00	7,37	100,00

Результаты исследований представлены в табл. 5, химический состав продуктов обогащения – в табл. 6.

По предлагаемой схеме был получен зо-

лото-медно-мышьяковистый концентрат, содержащий: золото – 43,2 г/т, медь – 5,51%, серебро – 89,8 г/т, мышьяк – 10,3% (при выходе концентрата 14,17%).

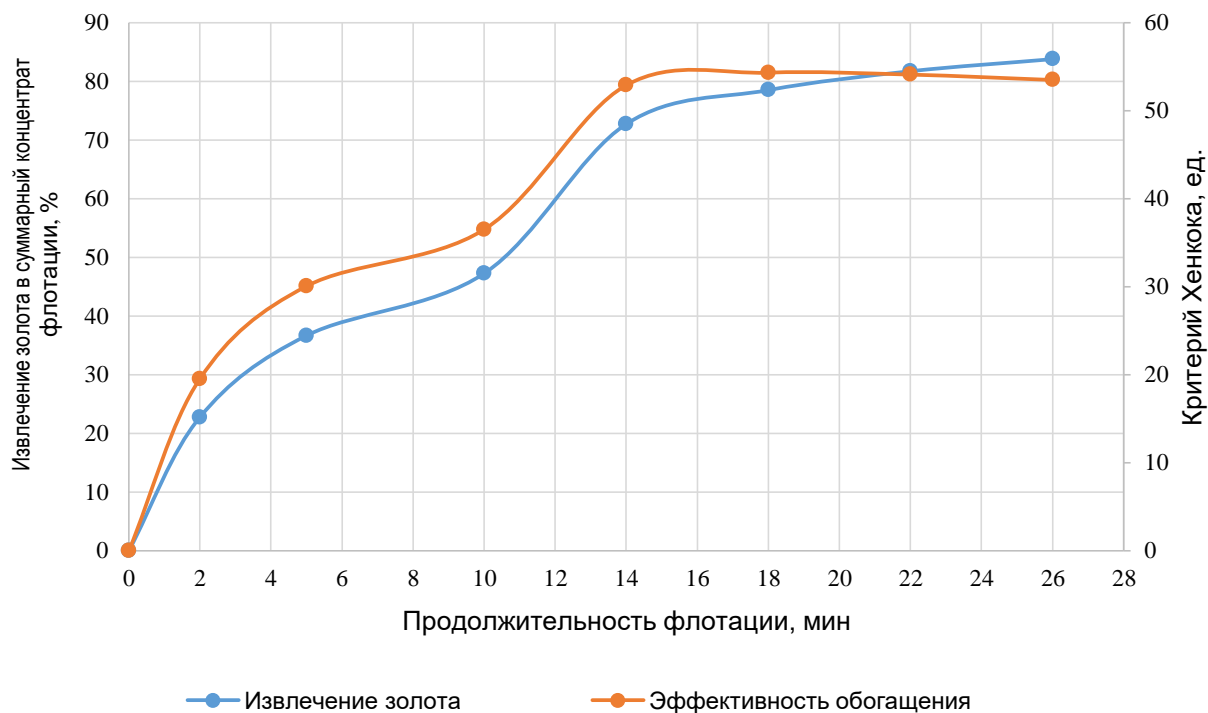


Рис. 3. Зависимость извлечения золота от продолжительности флотации  
Fig. 3. Gold recovery vs flotation duration

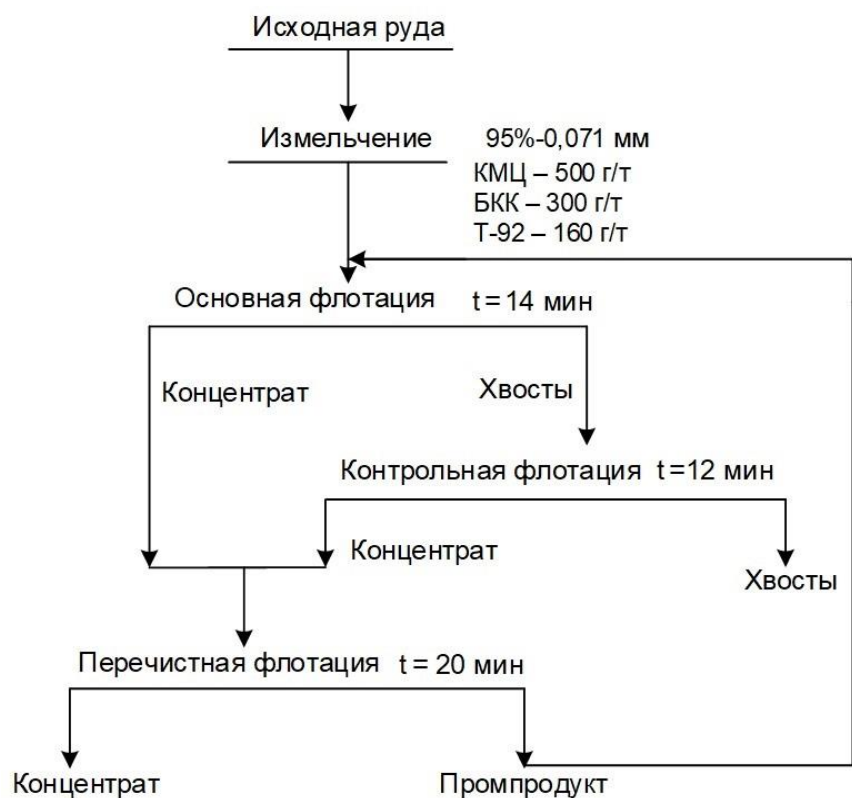


Рис. 4. Схема флотационного обогащения исходной руды при крупности 95 % -71 мкм  
Fig. 4. Diagram of flotation concentration of original ore of 95% -71 μm size

**Таблица 5.** Результаты флотационного обогащения пробы исходной руды крупностью 95% -71 мкм  
**Table 5.** Results of flotation concentration of the original ore sample of 95% -71 µm size

Продукты обогащения	Выход, %	Содержание				Извлечение, %			
		Au, г/т	Ag, г/т	Fe, %	S, %	Au	Ag	Fe	S
Концентрат флотации	14,17	43,20	89,80	26,10	20,90	80,21	76,72	54,71	86,95
Хвосты флотации	85,83	1,76	4,50	4,10	0,45	19,79	23,28	45,29	3,05
Исходная руда	100	7,63	16,59	7,22	3,35	100,0	100,0	100,0	100,0

**Таблица 6.** Химический состав продуктов флотации  
**Table 6.** Chemical composition of flotation products

Элементы, компоненты	Массовая доля элемента, %	
	Концентрат флотации	Хвосты флотации
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,61	5,8
CaO	4,6	11,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36,9	5,6
MgO	8,9	13,8
MnO	0,049	0,099
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,25	0,067
K <sub>2</sub> O	0,21	1,37
Na <sub>2</sub> O	<1,0	<1,0
TiO <sub>2</sub>	0,042	0,23
SiO <sub>2</sub>	15,9	34
As	10,3	1,4
Ba	0,0056	0,059
Bi	0,076	0,0039
Cd	0,003	<0,0002
Cr	<0,0050	<0,0050
Co	0,0081	<0,0005
Cu	5,51	0,12
Pb	0,0099	<0,0020
Sb	0,103	<0,005
Mo	0,0036	<0,0005
Ni	<0,0050	<0,0050
Sr	<0,0010	0,0093
Sn	0,0066	<0,0050
W	<0,010	<0,010
Zn	0,1	0,024
Ag, г/т	89,8	4,5

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По полученным данным при флотационном обогащении золотосодержащей руды месторождения «Тарор» (Республика Таджикистан) в качестве альтернативной технологической схемы предлагается схема, включающая основную, контрольную и пересорти-

ную флотации. В результате исследований было определено основное время флотации. Для достижения максимального извлечения золота в концентрат флотации продолжительность основной флотации в дальнейших тестах рекомендовано принять равной 14 мин, контрольной флотации – 12 мин.

Применение реагента-депрессора КМЦ в процессе флотационного обогащения способствовало повышению технологических показателей за счет сокращения выхода флотоконцентрата и значительного увеличения содержания металла в концентрате.

Результаты исследований показали, что измельчение исходной руды до крупности 95% -71 мкм позволяет вскрыть зерна золотосодержащих минералов, что благоприятно сказывается для последующих обогащательных и гидрометаллургических процессов. Таким образом, при измельчении исходной руды до крупности 80% -71 мкм извлечение золота в концентрат составило 70,17%, а при крупности 95% -71 мкм – повысилось на 10,04% и составило 80,21%.

В дальнейшем, с целью изучения влияния крупности частиц концентрата на извлечение золота, рассматривается проведение серии экспериментов по ультратонкому измельчению флотоконцентратов с обработкой полученного продукта методом атмосферного окисления с последующим цианированием в сорбционном режиме. Целесообразным является также изучение направления цианирования хвостов флотации.

## Список литературы

1. Маджидов Б.С. Минерально-сырьевая база драгоценных металлов Республики Таджикистан // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 5. С. 404–412.
2. Рахманов О.Б., Аксёнов А.В., Каримов М.И., Назаров Х.М. Извлечение золота и серебра из упорного

- золотосодержащего мышьяковистого флотоконцентрата месторождения «Иккижелон» с добавлением хлорида натрия в процессе автоклавного окисления // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 4. С. 896–905. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-896-905>



3. Сохибназаров М.Д. Из истории добычи золота в Таджикистане // Вестник Таджикского государственного университета права, бизнеса и политики. 2010. № 1. С. 34–39.
4. Солихов М.М., Аксёнов А.В., Васильев А.А., Каримов М.И., Рахманов О.Б. Поиск оптимальной технологической схемы переработки упорных золотосодержащих руд месторождения «Тарор» (Республика Таджикистан) // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 180–190. <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-182-192>
5. Солихов М.М., Рахманов О.Б., Аксёнов А.В., Захаренков Р.И. Анализ данных по месторождению «Тарор» // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: матер. VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 21–22 апреля 2016 г.). Иркутск, 2016. С. 82–85.
6. Стрижко Л.С., Бобохонов Б., Бобоев И.Р. Исследование и разработка технологии извлечения золота из окисленных руд одного из крупнейших месторождений Таджикистана // Цветные металлы. 2012. № 7. С. 41–44.
7. Захаров Б.А., Меретуков М.А. Золото: упорные руды. М.: ИД «Руда и металлы», 2013. 452 с.
8. Меретуков М.А. Золото. Химия. Минералогия. Металлургия. М.: ИД «Руда и металлы», 2008. 518 с.
9. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: монография. В 2 т., т. 1, т. 2. Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 1999. 342 с.; 452 с.
10. Chen Yong, Song Yongsheng, Li Wenjuan, Cai Liulu. Mineralogical characteristics of a micro-fine and low grade refractory gold ore // International Conference on Materials Applications and Engineering 2017 (ICMAE2017): MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 142. P. 02011. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814202011>
11. Рахманов О.Б., Аксёнов А.В., Немчинова Н.В., Солихов М.М., Черношвец Е.А. Поиск оптимальной технологии переработки золотосодержащих руд месторождения «Иккижелон» (Республика Таджикистан) // Металлургия: технологии, инновации, качество «Металлургия–2017»: тр. XX Междунар. науч.-практ. конф. (г. Новокузнецк, 15–16 ноября 2017 г.). Новокузнецк, 2017. Ч. 1. С. 118–122.
12. Lacouture B., Wilson B., Oliver J., Lumsden B. Increased extraction of thin sulfide minerals in operation Red Dog factory // 28 International Mineral Processing Congress (IMPC 2016): Proceedings of a meeting held (Quebec, 11–15 September 2016). Quebec: Canadian Institute of Mining Metallurgy and Petroleum, 2016.
13. Секисов А.Г., Зыков Н.В., Королёв В.С. Дисперсное золото. Геологический и технологический аспекты. М.: Изд-во «Горная книга», 2012. 224 с.
14. Adams M.D. Gold ore processing: project development and operations. Amsterdam: Elsevier Science, 2016. 980 p.
15. Аксёнов А.В., Васильев А.А., Охотин В.Н., Швеца А.А. Применение ультратонкого измельчения при переработке минерального сырья // Известия вузов. Цветная металлургия. 2014. № 2. С. 20–25. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2014-2-20-25>
16. Chen T.T., Cabri L.J., Dutrizac J.E. Characterizing gold in refractory sulfide gold ores and residues // JOM. 2002. Vol. 54. P. 20–22. <https://doi.org/10.1007/BF02709181>
17. Барченков В.В. Основные технологические процессы переработки золотосодержащих руд. СПб.: Изд-во «Интермедия», 2013. 469 с.
18. Ковалев В.Н., Голиков В.В., Рылов Н.В. Особенности разработки технологических схем обогащения углеводородсодержащих золотосульфидных руд // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 2017. Т. 10. № 1. С. 99–109. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0010>
19. Меретуков М.А., Санакулов К.С., Зимин А.В., Арустамян М.А. Золото: химия для металлургов и обогащателей. М.: ИД «Руда и Металлы», 2014. 412 с.
20. Рубинштейн Ю.Б. Кинетика флотации. М.: Изд-во «Недра», 1980. 375 с.

### References

1. Madzhidov BS. Precious mineral resources of the Republic of Tajikistan. *Gornyi informacionno-analiticheskiy byulleten'* = Mining informational and analytical bulletin. 2017;5:404–412. (In Russ.)
2. Rakhmanov OB, Aksenov AV, Karimov MI, Nazarov KhM. Gold and silver recovery from a refractory gold-containing arsenic flotation concentrate obtained at the Ikkijelon deposit with the addition of sodium chloride in the process of autoclave oxidation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(4):896–905. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-896-905>
3. Soxibnazarov MD. The history of golden of Tajikistan. *Vestnik Tadjikskogo gosudarstvennogo universiteta prava, biznesa i politiki* = Bulletin of the Tajik State University of Law, Business and Politics. 2010;1:34–39. (In Russ.)
4. Solikhov MM, Aksenov AV, Vasiliev AA, Karimov MI, Rakhmanov OB. Search for optimal processing technology for Taror deposit refractory gold ores (Republic of Tajikistan). *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018;22(2):180–190. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-182-192>
5. Solikhov MM, Rakhmanov OB, Aksenov AV, Zakharonov RI. Taror deposit data analysis. *Perspektivy razvitiya tekhnologii pererabotki uglevodorodnykh i mineral'nykh resursov: materialy VI Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = Development prospects of technology for hydrocarbon and mineral resources processing: materials of VI All-Russian scientific and practical conference with international participation. 21–22 April 2016, Irkutsk. Irkutsk; 2016, p. 82–85. (In Russ.)
6. Strizhko LS, Bobokhonov B, Boboev IR. Research of

technology development for the gold recovery from oxidized ores on one of the greatest deposits of the republic of Tajikistan. *Tsvetnye Metally*. 2012;7:41–44. (In Russ.)

7. Zakharov BA, Meretukov MA. Gold: refractory ores. Moscow: Ruda i metally; 2013, 452 p. (In Russ.)

8. Meretukov MA. Gold. Chemistry. Mineralogy. Metallurgy. Moscow: Ruda i metally; 2008, 518 p. (In Russ.)

9. Lodejshchikov VV. Technology for gold and silver extraction from refractory ores: monograph. Irkutsk: OAO «Irgiredmet»; 1999, 342 p.; 452 p. (In Russ.)

10. Chen Yong, Song Yongsheng, Li Wenjuan, Cai Liulu. Mineralogical characteristics of a micro-fine and low grade refractory gold ore. In: *International Conference on Materials Applications and Engineering 2017 (ICMAE2017): MATEC Web of Conferences*. 2018;142:02011. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814202011>

11. Rakhmanov OB, Aksenov AV, Nemchinova NV, Solihov MM, Chernoshvec EA. Search for the optimal processing technology for the gold-bearing ore of the Ikkijelon deposit (Republic of Tajikistan). In: *Metallurgiya: tekhnologii, innovacii, kachestvo. Metallurgiya – 2017: trudy XX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Metallurgy: technologies, innovations, quality. Metallurgy-2017: Proceedings of XX International scientific and practical Conference*. 15–16 November 2017, Novokuznetsk. Novokuznetsk; 2017, p.118–122. (In Russ.)

12. Lacouture B, Wilson B, Oliver J, Lumsden B. Increased extraction of thin sulfide minerals in operation Red Dog factory. In: *28 International Mineral Processing*

*Congress (IMPC 2016): Proceedings of a meeting held 11–15 September 2016, Quebec. Quebec: Canadian Institute of Mining Metallurgy and Petroleum; 2016.*

13. Sekisov AG, Zykov NV, Korolev VS. Dispersed gold. Geological and technological aspects. Moscow: Gornaya kniga; 2012, 224 p. (In Russ.)

14. Adams MD. *Gold ore processing: project development and operations*. Amsterdam: Elsevier Science; 2016, 980 p.

15. Aksenov AV, Vasiliev AA, Okhotin VN, Shvets AA. Application of ultrafine grinding for mineral raw materials processing. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2014;(2):20–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2014-2-20-25>

16. Chen TT, Cabri LJ, Dutrizac JE. Characterizing gold in refractory sulfide gold ores and residues. *JOM*. 2002;54:20–22. <https://doi.org/10.1007/BF02709181>

17. Barchenkov VV. The main technological processes of gold-bearing ore processing. Saint-Petersburg: Intermediya; 2013, 469 p. (In Russ.)

18. Kovalev VN, Golikov VV, Rylov NV. Features of the development of processing flow sheets of carbon-gold-sulphide ores. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Himiya = Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2017;10(1): 99–109. (In Russ.)

19. Meretukov MA, Sanakulov KS, Zimin AV, Arustamyan MA. Gold: chemistry for metallurgists and concentrators. Moscow: Ruda i Metally; 2014, 412 p. (In Russ.)

20. Rubinshtein YuB. Flotation kinetics. Moscow: Nedra; 1980, 375 p. (In Russ.)

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Солихов Мирзобедил Мирзошарифович**,  
младший научный сотрудник,  
ООО НИИПИ «ТОМС»,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83/1, Россия;  
✉ e-mail: mirzo.solikhov88@mail.ru

**Аксёнов Александр Владимирович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры металлургии цветных металлов,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: aksenov@tomsgroup.ru

**Каримов Мурад Ильясович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры металлургии,  
Горно-металлургический институт Таджикистана,  
735730, г. Бустон, ул. Московская, 6, Таджикистан;  
e-mail: murodkhon.k@rambler.ru

**Минеев Геннадий Григорьевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор-консультант кафедры металлургии  
цветных металлов,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: kafmcm@istu.edu

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Mirzobedil M. Solikhov**,  
Junior Researcher,  
Institute of Technologies of Mineral Separation LLC,  
83/1, Lermontov St., Irkutsk 664074 Russia;  
✉ e-mail: mirzo.solikhov88@mail.ru

**Aleksandr V. Aksenov**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Non-Ferrous  
Metals Metallurgy,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074 Russia;  
e-mail: aksenov@tomsgroup.ru

**Murad I. Karimov**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Metallurgy Department,  
Mining and Metallurgical Institute of Tajikistan,  
6, Moskovskaya St., Buston 735030, Tajikistan;  
e-mail: murodkhon.k@rambler.ru

**Gennadiy G. Mineev**,  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Consulting Professor of the Department of Non-Ferrous  
Metals Metallurgy,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074 Russia;  
e-mail: kafmcm@istu.edu



**Рахманов Одилжон Бозорович,**  
младший научный сотрудник,  
ООО НИИПИ «ТОМС»,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83/1, Россия;  
e-mail: rakhmanov.salam@mail.ru

**Odilzhon B. Rakhmanov,**  
Junior Researcher,  
Institute of Technologies of Mineral Separation LLC,  
83/1, Lermontov St., Irkutsk 664074 Russia;  
e-mail: rakhmanov.salam@mail.ru

**Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 10.01.2021; одобрена после рецензирования 11.06.2021; принята к публикации 18.08.2021.

**Information about the article**

The article was submitted 10.01.2021; approved after reviewing 11.06.2021; accepted for publication 18.08.2021.