



ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-168>

УДК 622.7:622.34(001)[571.76]

**Сравнительные технологические исследования золотосодержащей руды месторождения Аркачан методами сухого обогащения и классической мокрой гравитации****А. И. Матвеев , И. Ф. Лебедев , В. Р. Винокуров , Е. С. Львов**

Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Якутск, Российская Федерация

ivleb@mail.ru**Аннотация**

Использование сухих технологий переработки и обогащения минерального сырья является одним из перспективных направлений, так как данный способ производства концентрата менее энергозатратен, менее трудоемок и экономически выгоден. В работе приведены экспериментальные работы по предварительному сухому обогащению руд месторождения Аркачан для определения качества обогащения продуктов разделения. Исследования на обогатимость проводились на опытных установках сухого метода переработки и обогащения руд: дробилке комбинированного ударного действия ДКД-300, центробежной мельнице ЦМВУ-800, пневмосепараторе ПОС-2000. Обработка полученных продуктов разделения пневмосепарацией и грохочением по последовательной схеме дробления и измельчения проводилась в лабораторных условиях на гравитационном концентрационном столе СКО-0,5. GRG-тест проходил на центробежном концентраторе ИТОМАК-0,1 по последовательной схеме измельчения. Анализ проведённого GRG-теста показал, что для более приемлемых условий гравитационного обогащения золота – до 73,91 % – необходима степень измельчения до 80 % класса –0,071 мм для получения гравитационного концентрата с содержанием 70,28 г/т золота.

Ключевые слова

дробилка, мельница, пневмосепаратор, сухое обогащение, классификация, измельчение, концентрат, золото, извлечение, эффективность

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0022, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800089-2) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант №13.ЦКП.21.0016).

Для цитирования

Matveev A. I., Lebedev I. F., Vinokurov V. R., Lvov E. S. Comparative processing studies of the Arkachan deposit gold-bearing ores using dry separation and classical wet gravity separation methods. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(2):158–169. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-168>

BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Research paper

Comparative processing studies of the Arkachan deposit gold-bearing ores using dry separation and classical wet gravity separation methods**A. I. Matveev , I. F. Lebedev , V. R. Vinokurov , E. S. Lvov**

Federal Research Center “Yakutsk Research Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”
N.V. Chersky North Mining Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

ivleb@mail.ru**Abstract**

The use of dry methods of processing and beneficiation of mineral raw materials is one of the promising areas, as this approach to concentrate production is less energy-consuming, less labor-intensive, and economically beneficial. The paper presents experimental studies on preliminary dry separation of Arkachan deposit ores to determine the quality of beneficiation of the separation products. The studies on dressability were carried out on pilot plants for dry ore processing and beneficiation: combined impact crusher DKD-300, centrifugal mill



TsMVU-800, pneumatic separator POS-2000. Processing of the obtained separation products by pneumatic separation and screening according to the sequential flow chart of crushing and grinding was carried out in laboratory conditions at a gravity concentration table SKO-0.5. The GRG test was performed at an ITOMAK-0.1 centrifugal concentrator using a sequential grinding circuit. The GRG test showed that for more efficient gravity separation of gold, up to total gold recovery of 73.91%, the degree of grinding up to 80% passing 0.071 mm was required, allowing obtaining a gravity concentrate graded at 70.28 g/t gold.

Keywords

crusher, mill, pneumatic separator, dry separation, screening, grinding, concentrator, gold, recovery, performance

Acknowledge

The study was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. 0297-2021-0022, EGISU Research and Development Center No. 122011800089-2) with the use of the equipment of the TsKP of the FRC YaSC SB RAS (grant No. 13.TsKP.21.0016).

For citation

Matveev A. I., Lebedev I. F., Vinokurov V. R., Lvov E. S. Comparative processing studies of the Arkachan deposit gold-bearing ores using dry separation and classical wet gravity separation methods. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(2):158–169. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-168>

Введение

Снижение себестоимости готовой продукции путем применения наиболее экономически выгодных процессов и технологий переработки и обогащения полезных ископаемых – одна из актуальных задач в горно-обогатительной промышленности. Одним из перспективных направлений является использование сухих технологий обогащения минерального сырья, так как данный способ производства концентрата имеет ряд существенных преимуществ.

Целью работы является проведение экспериментальных работ по предварительному сухому обогащению руд месторождения Аркачан для определения качества обогащения продуктов разделения, с выделением золота из концентрата и хвостов пневмосепарации методами гравитационного обогащения.

Пробы руды месторождения Аркачан по вещественному составу представляют собой кусковой рудный материал крупностью – 150+40 мм, с прожилками кварц-карбонатного, кварц-карбонат-сульфидного, кварц-гетитового и кварц-лимонитового состава.

Технология испытаний по сухому обогащению руд предусматривает обработку продуктов разделения для максимального выделения свободного золота из продуктов и корректного учёта при определении качественно-количественных показателей процессов разделения [1–3].

Технология предусматривает два взаимосвязанных процесса:

- рудоподготовка (дробление и измельчение) для раскрытия свободного золота до 50 мк [4–6];
- пневматическая сепарация с получением концентратов с высоким содержанием раскрытого свободного золота крупностью до 100 мк.

Базовая комплектация технологии предусматривает использование дробилки ДКД-300¹ [7, 8] основанной на способе многократного ударного действия [9, 10] с производительностью до 15 т/ч, цен-

тробежной мельницы ЦМБУ-800² производительностью до 6 т/ч и пневмосепаратора ПОС-2000 с производительностью до 6 т/ч.

Классическая мокрая гравитация проводилась по методике GRG-теста, предусматривающего последовательное раскрытие и извлечение золота по мере ступенчатого измельчения руды. GRG-тест состоит из трех последовательных стадий раскрытия минералов и трех стадий обогащения.

Для сравнительной характеристики двух технологий определялись и использовались оптимальные технологические параметры дробления на аппаратах дробления и измельчения, фракционные составы дробления и измельчения, раскрываемость минералов золота из рудной матрицы, результаты проведенных исследований по сухому обогащению измельченной фракции на пневмосепараторе ПОС-2000 с определением извлечения минералов золота пневмосепарацией, степени сокращения [11, 12]. Определение качества обогащения и продуктов разделения производилось по классам крупности. Дана технологическая оценка и обоснованы возможности применения сухого обогащения руды для получения золотых концентратов на предварительной стадии обогащения [13, 14].

Общая методика проведённых исследований по обработке рудных проб

Экспериментальная обработка пробы проводилась комплексно с базовой последовательной обработкой рудной пробы массой не менее 500 кг. Небольшая часть исходной пробы оставлена для арбитражных исследований.

¹ Матвеев А.И., Винокуров В.П., Григорьев А.Н., Монастырев А.М. Патент № 2111055 РФ. Дробилка комбинированного ударного действия. Опубликовано 20.05.1998.

² Матвеев А.И., Григорьев А.Н., Филиппов В.Е. Патент №2150323 7 В02 С 13/20. Центробежный измельчитель встречного удара. Институт горного дела Севера СО РАН. Опубликовано 10.06.2000; Матвеев А.И., Винокуров В.Р., Григорьев А.Н. Патент № 2746502 В02С 7/00. Вертикальный центробежный измельчитель. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук. Опубликовано 14.04.2021.



Испытания проводились по технологической схеме, предусматривающей последовательную переработку руды на дробилке ДКД-300, мельнице ЦМВУ-800 и пневмосепараторе ПОС-2000 (рис. 1).

Для проведения сквозных испытаний исходная проба после каждого цикла дробления разделялась методом грохочения на классы крупности +5 мм, –5+3 мм и –3+0 мм.

Классы крупности +5 мм, образующиеся в процессе дробления, подвергались последовательному стадийному дроблению на дробилке ДКД-300, число циклов которых определялось достаточной степенью убыли массы классов +5 мм после последнего цикла дробления.

Продукты дробления классов крупности –5+3 мм и –3+1 мм измельчались на центробежной мельнице ЦМВУ-800. Продукты измельчения обогащались на пневмосепараторе ПОС-2000 с получением концентрата и хвостов. Для сквозных испытаний измельчение и пневмосепарация производились последовательно.

Концентраты пневмосепарации подвергались грохочению для разделения на два класса –1 мм и +1 мм. Далее образующиеся классы –1 мм концентрировались на столе СКО-0,5, затем на анализаторе Мозли для выделения свободного золота доводкой (магнитная сепарация и промывка в бромформе).

Класс крупности –3+0 мм, полученный после первичного дробления, также подвергался грохочению

с выделением класса +1 мм, который направлялся на доизмельчение с пневмосепарацией. Продукты классификации классов крупности +1 мм и –1 мм подвергались пневмосепарации на ПОС-2000 с получением концентрата и хвостов.

Для выделения свободного золота из концентратов пневмосепарации использовались операции доводки на анализаторе Мозли, магнитной сепарации и промывки в бромформе.

Все продукты дробления и измельчения подвергались гранулометрическому анализу с соответствующим отбором проб, а продукты разделения пневмосепарации, концентратного стола, анализатора Мозли после полного извлечения частиц свободного золота анализировались пробирным или атомно-адсорбционным анализом на содержание остаточного золота.

По результатам проведённых исследований производился расчёт качественно-количественных показателей схемы обработки пробы. А качество разделения пневмосепарацией определялось после анализа продуктов обработки с учётом извлечённого количества свободного золота.

В завершающем этапе был проведен балансовый расчёт продуктов обработки по содержанию золота и извлечения по циклам обработки (дробление–измельчение–пневмосепарация) и в целом по обработке пробы.

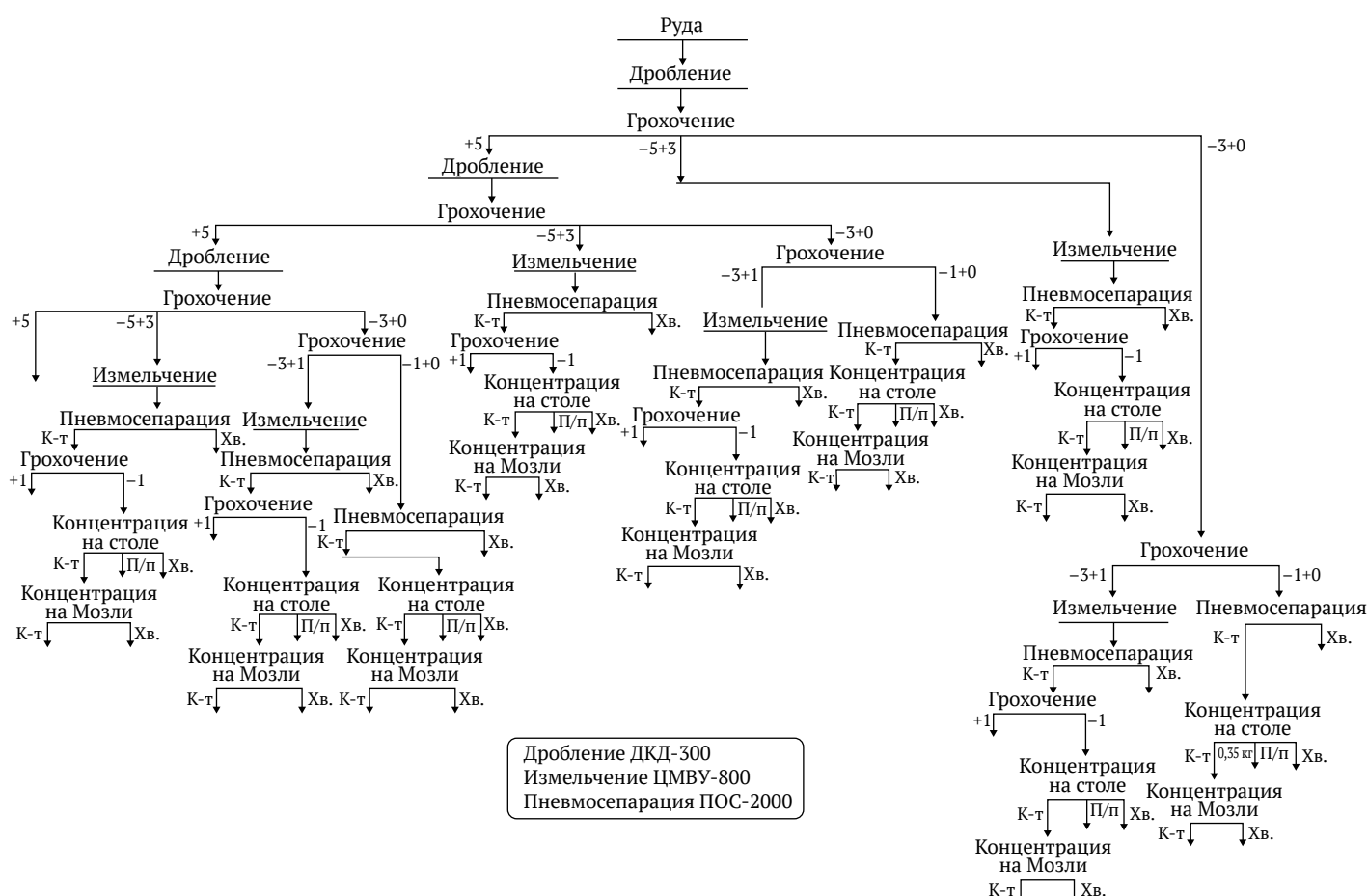


Рис. 1. Технологическая схема обработки проб

Методика проведенного GRG-теста по оценке гравитационной обогатимости золотосодержащей руды

Проведено исследование исходной пробы руды по GRG-тесту для определения обогатимости золота рудных объектов на базе использования центробежного концентратора Кнелсон [15–17]. Технология GRG-теста основана на последовательном выводе раскрытого золота по стадиям измельчения, т.е. по мере их раскрытия, и исключает переизмельчение и истирание крупных частиц металла [18, 19]. GRG-тест предполагает проведение трех последовательных циклов раскрытия минералов и соответствующих трех циклов последующего обогащения [20, 21].

По GRG-тесту регламентируются уровни измельчения испытываемых материалов:

1-я стадия – до 100 % выхода класса крупности –1 мм;

2-я стадия – до 80 % выхода класса крупности –0,315 мм;

3-я стадия – 88 % выхода класса крупности –0,071 мм.

На первой стадии измельчения применялась дробилка активного удара ДАУ-250, техническая характеристика приведена в табл. 1.

Таблица 1

Техническая характеристика дробилки ДАУ-250

Параметры	Показатели
Наибольший размер загружаемого материала, мм	100
Размер щели разгрузочной решетки, мм	1–10
Мощность электродвигателя, кВт	7,5
Обороты электродвигателя, об/мин	960–1490
Производительность по исходному, т/ч	1,0
Масса с электродвигателем, т	0,8



Рис. 2. Лабораторная шаровая мельница МШЛ-120

Первоначальная масса пробы, отобранной для теста, составляет 65 кг, которая измельчалась и обогащалась с получением концентрата и хвостов.

На вторую стадию поступали измельченные хвосты первой стадии, на третью – измельченные хвосты второй стадии, измельчение проводилось на лабораторной шаровой мельнице МШЛ-120. Общий вид шаровой лабораторной мельницы приведен на рис. 2, техническая характеристика приведена в табл. 2.

Обогащение проводилось на центробежном концентраторе ИТОМАК-0,1 (рис. 3). Центробежный концентратор является российским аналогом концентратора Кнелсон, технологические характеристики являются сопоставимыми при равных условиях их эксплуатации. Технические характеристики ИТОМАК-0,1 приведены в табл. 3.

Схема проведения GRG-теста с использованием оборудования ДАУ-250, МШЛ-120, ИТОМАК-0,1 представлена на рис. 4.

Таблица 2

Техническая характеристика МШЛ-120

Параметры	Показатели
Объем барабана, л	120
Крупность исходного материала, мм, не более	8
Частота вращения барабана, об/мин	48–60
Крупность готового продукта, мм	–0,071
Шаровая загрузка, кг	До 80
Диаметр шаров, мм, в пределах	20–80
Установленная мощность, кВт	1,5
Режим работы	Периодический, непрерывный
Способ помола	Сухой



Рис. 3. Центробежный концентратор ИТОМАК-0,1



Результаты исследований технологических проб месторождения Аркачан по дроблению, измельчению и пневмосепарации

Согласно методике проведенных исследований тестируемая схема обработки проб представляет собой последовательные операции раскрытия золота стадийным дроблением, измельчением и пневмосепарацией измельченных материалов класса -3 мм, осуществляемыми непосредственно в дробилке ДКД-300, в мельнице ЦМВУ-800 и в пневмосепараторе ПОС-2000.

Испытания проводились по технологической схеме, представленной на рис. 1, согласно общей методике, предусматривающей последовательное дробление руды на дробилке.

Всего в ходе обработки пробы провели три цикла дробления на дробилке ДКД-300 (табл. 4).

Таблица 3

Техническая характеристика ИТОМАК-0,1

Параметры	Показатели
Мощность электродвигателя, Вт	250
Напряжение питания трехфазной переменной сети*, В	380 ± 38
Производительность по твердому осадку, кг/ч	100
Производительность по пульпе, м ³ /ч	0,37
Максимальный расход промывочной воды, м ³ /ч	2,5
Крупность подаваемого материала (для аллювия), мм, не более	2,0
Крупность подаваемого материала (для руды), мм, не более	0,5
Содержание твердого в пульпе, %	до 75
Объем концентрата, мл, не более	120
Масса изделия, кг, не более	55
Габаритные размеры изделия, мм, Д×Ш×В, не более	$550 \times 350 \times 780$

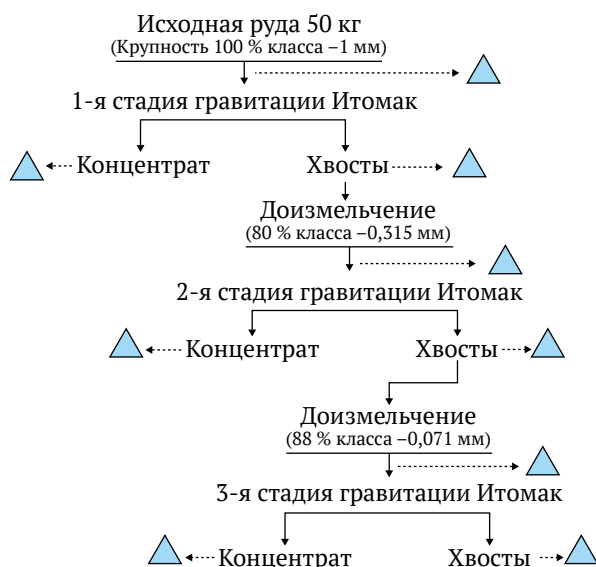


Рис. 4. Схема проведения GRG-теста

Как видно из табл. 4, максимальная степень дробления по циклам составила 9,35.

Измельчение рудных проб производилось в центробежной ступенчатой мельнице ЦМВУ-800 по технологической схеме, представленной на рис. 1. Продукты дробления и грохочения классов крупности $-5+3$ мм и $-3+1$ мм (табл. 5, 6) являлись питанием измельчения. Все продукты измельчения подвергались пневмосепарации на пневмосепараторе ПОС-2000.

Как видно по полученным результатам (см. табл. 5), при измельчении классов крупности $-3+1$ мм минимальное значение степени измельчения (дробления) составило 2,01 и максимальное 2,17 мм. При измельчении более крупных классов $-5+3$ мм степень измельчения (дробления) колебалась от 3,05 до 3,59 мм (см. табл. 6), что существенно выше. Это связано с особенностью ударного измельчения в центробежных мельницах, где сказывается влияние массы разрушаемого куска. Чем массивнее и крупнее частица, тем больше энергия динамического воздействия при соударении частиц с рабочими органами мельницы, соответственно выше и степень измельчения.

Пневмосепаратор ПОС-2000 испытывался в двух режимах работы. Первый режим в последовательной совместной работе с центробежной мельницей ЦМВУ-800 и раздельная пневмосепарация отсевов грохочения продуктов обработки пробы класса -1 мм. Полученный концентрат пневмосепарации разделялся на два класса -1 и $+1$ мм. Класс крупности -1 мм обогащался на концентрационном столе СКО-0,5 для получения черного концентрата. Концентрат стола далее обрабатывался на анализаторе Мозли до получения ультраконцентрата «золотой головки».

Содержание золота в классах крупности $+1$ мм и в хвостах пневмосепарации определялось пробирным анализом.

Таблица 4

Гранулометрические составы продуктов дробления на дробилке ДКД-300

Класс крупности, мм	Выход, %		
	1-й цикл	2-й цикл	3-й цикл
$-0,071$	3,57	2,44	2,18
$-0,1+0,071$	1,99	0,62	0,76
$-0,2+0,1$	2,82	1,66	2,27
$-0,315+0,2$	1,15	1,07	1,47
$-0,63+0,315$	3,61	1,93	2,58
$-1+0,63$	4,92	2,86	3,44
$-2+1$	8,78	5,92	7,22
$-5+2$	22,93	32,07	37,40
$-10+5$	14,59	24,63	23,03
$-20+10$	21,23	22,44	17,34
$-40+20$	8,83	4,34	2,31
$+40$	5,59	0,00	0,00
Степень дробления	9,35	2,28	2,02



Во втором режиме работы, т.е. при пневмосепарации продуктов грохочения класса крупности –1 мм, полученный концентрат пневмосепарации также для анализа качества разделения обогащался на концентрационном столе СКО-0,5. Далее для выделения золотой головки концентрат обрабатывался на столе Мозли.

Результаты обогащения при трех разных производительностях пневмосепаратора после обработки продуктов сепарации концентрацией на СКО и на анализаторе Мозли с соответствующими результатами анализов содержания золота в продуктах разделения приведены в табл. 7.

Таблица 5

Гранулометрические характеристики измельчения продуктов циклов дробления класса крупности –3+1 мм

Класс крупности, мм	1-й цикл		2-й цикл		3-й цикл	
	Исходное	После измельчения	Исходное	После измельчения	Исходное	После измельчения
–0,071+0	0,00	4,11	0,00	4,10	0,00	2,64
–0,1+0,071	0,00	2,85	0,00	2,25	0,00	2,58
–0,2+0,1	0,00	14,24	0,00	14,13	0,00	15,10
–0,315+0,2	0,00	9,49	0,00	8,71	0,00	7,82
–0,5+0,315	0,00	9,18	0,00	10,39	0,00	10,57
–1+0,5	0,00	26,58	0,00	28,35	0,00	31,26
–1,6+1	64,06	25,95	68,66	25,61	70,35	24,73
–2,5+1,6	19,93	7,59	17,31	6,46	16,40	5,29
–3,2+2,5	16,01	0,00	14,03	0,00	13,25	0,00
Степень измельчения	–	2,17	–	2,15	–	2,01

Таблица 6

Гранулометрические характеристики измельчения продуктов циклов дробления класса крупности –5+3 мм

Класс крупности, мм	1-й цикл		2-й цикл		3-й цикл	
	Исходное	После измельчения	Исходное	После измельчения	Исходное	После измельчения
–0,071+0	0,00	16,71	0,00	10,25	0,00	8,74
–0,1+0,071	0,00	6,48	0,00	4,30	0,00	4,14
–0,2+0,1	0,00	15,46	0,00	14,75	0,00	14,25
–0,315+0,2	0,00	7,23	0,00	9,22	0,00	9,20
–0,5+0,315	0,00	5,49	0,00	8,81	0,00	8,05
–1+0,5	0,00	13,72	0,00	18,03	0,00	17,24
–1,6+1	0,00	16,71	0,00	17,83	0,00	20,00
–2,5+1,6	0,00	6,73	0,00	6,35	0,00	6,90
–3,2+2,5	78,97	11,47	86,52	9,22	74,40	10,34
–5+3,2	21,04	0,00	13,48	1,23	25,60	1,15
Степень измельчения	–	3,59	–	3,34	–	3,05

Таблица 7

Результаты обогащения пневмосепарацией

№	Продукт	Производительность, т/ч	Вес, г	Выход, %	Содержание золота		Извлечение Е, %
					г	г/т	
	Обогащение ПОС-9-1	6	54950	100,00	0,91	16,61	100,00
1	Концентрат ПОС-9-1		16600	30,21	0,29	17,47	31,76
2	Хвосты ПОС-9-1		30107,5	54,79	0,55	18,20	60,02
3	Отдув ПОС-9-1		8242,5	15,00	0,08	9,10	8,22
	Обогащение ПОС-9-2	3	52500	100,00	0,88	16,73	100,00
1	Концентрат ПОС-9-2		22200	42,29	0,30	13,65	34,50
2	Хвосты ПОС-9-2		22425	42,71	0,38	17,10	43,66
3	Отдув ПОС-9-2		7875	15,00	0,19	8,55	21,83
	Обогащение ПОС-9-3	1,8	43050	100,00	0,59	13,75	100,00
1	Концентрат ПОС-9-3		16600	38,56	0,21	12,57	35,25
2	Хвосты ПОС-9-3		1992,5	46,44	0,33	16,50	55,75
3	Отдув ПОС-9-3		6457,5	15,00	0,05	8,25	9,00



Наибольшее извлечение золота – 35,25 % – наблюдается при наименьшей производительности – 1,8 т/ч (т.е. в наиболее спокойном варианте сепарации), однако рациональный уровень производительности в данном случае – 3 т/ч. Содержание золота в хвостах пневмосепарации во всех случаях выше, чем в концентрате, что свидетельствует о сносе тонкого и связанного золота в хвосты.

Результаты проведенного GRG-теста

GRG-тест проводился на исходной пробе руды массой 65 кг на центробежном концентраторе ИТОМАК-0,1 при следующих режимах: производительность по твердому осадку – 100 кг/ч; производительность по пульпе – 0,37 м³/ч; максимальный расход промывочной воды – 2,5 м³/ч.

Содержание твердого в пульпе, подаваемой на гравитационное обогащение, 25–30%. Данный тест проводится в три стадии. На 1-й стадии руду массой 65 кг дробили на ударной дробилке ДАУ-250 до крупности 100 % класса –1,0 мм и дробленую руду пропускали через концентратор ИТОМАК-0,1. Далее хвосты первой стадии доизмельчали до крупности 80 % класса –0,315 мм и пропускали через концентратор ИТОМАК. На 3-й стадии хвосты 2-й стадии доизмельчали до крупности 88 % класса –0,071 мм. Во время процесса на всех стадиях из хвостов отбирали пробы для гранулометрического анализа. Из всех концен-

тратов и хвостов гравитационного обогащения на центробежном концентраторе ИТОМАК отбирались пробы для определения грансостава, а также для пробирного анализа на содержание золота.

Исходная проба массой 65 кг изначально продроблена до крупности –1 мм. Для предварительного распределения золота по классам крупности произведен рассев по классам крупности на ситах с размерностью 0,63, 0,5, 0,315, 0,2, 0,1, 0,071 мм. Из каждого полученного класса крупности отобраны навески для пробирного анализа. По результатам анализа составлена таблица распределения золота по классам крупности (табл. 8). Из таблицы видно, что золото распределено по классам крупности неравномерно. Наибольшее содержание золота обнаружено в мелких классах крупности –0,2 мм, при этом наибольшая доля золота приходится на классы –0,2+0,1 мм и –0,071 мм – 27,35 и 23,46 % соответственно.

При обогащении данной пробы на центробежном концентраторе ИТОМАК получены концентрат массой 2,573 кг и хвосты массой 61,327 кг. Полученные продукты подверглись расситовке на классы крупности: –1+0,63 мм; –0,63+0,5 мм; –0,5+0,315 мм; –0,315+0,2 мм; –0,2+0,1 мм; –0,1+0,071 мм; –0,071 мм. Материал из каждого класса подвергался пробирному анализу. Результаты анализов и распределение золота в первой стадии представлены в табл. 9.

Таблица 8

Распределение золота по классам крупности в исходной пробе крупностью –1,0 мм

Класс крупности, мм	Выход, %	Масса, г	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %
–1+0,63	32,20	20575,8	2,12	14,74
–0,63+0,5	6,80	4345,2	3,52	5,17
–0,5+0,315	13,20	8434,8	3,78	10,77
–0,315+0,2	9,00	5751	3,48	6,76
–0,2+0,1	12,30	7859,7	10,3	27,35
–0,1+0,071	6,30	4025,7	8,64	11,75
–0,071+0	20,20	12907,8	5,38	23,46
Итого	100	63900	4,63	100,00

Таблица 9

Результаты первой стадии GRG-теста

Класс крупности, мм	Концентрат				Хвосты			
	Выход, %	Масса, г	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %	Выход, %	Масса, г	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %
–1+0,63	21,72	558,93	13,0	3,35	12,30	7543,22	4,12	9,64
–0,63+0,5	17,07	439,09	8,80	1,78	8,80	5396,78	5,20	8,70
–0,5+0,315	17,02	438,03	21,6	4,36	12,60	7727,20	5,08	12,18
–0,315+0,2	13,89	357,42	41,1	6,78	13,40	8217,82	8,80	22,43
–0,2+0,1	21,39	550,45	115	29,20	22,60	13859,90	4,96	21,32
–0,1+0,071	4,70	120,91	284	15,84	9,40	5764,74	4,96	8,87
–0,071+0	4,20	108,18	775	38,68	20,90	12817,34	4,24	16,86
Итого	100	2573	84,24	100	100	61327,00	5,26	100



По данным табл. 9 видно, что в 1-й стадии гравитационного обогащения дробленой руды до крупности -1 мм высокие значения распределения золота находятся в концентрате в нижних классах крупности ($-0,2+0,1$ мм; $-0,1+0,071$ мм; $-0,071$ мм), при этом заметно перераспределение золота в данных классах с суммарной долей 83,72 % в классах $-0,2$ мм. Что касается хвостов, то во всех классах крупности наблюдается примерно одинаковое содержание золота, но в крупных классах $+0,315$ мм содержание золота выше. Наибольшее содержание приходится на класс $-0,315+0,2$ мм – 8,8 г/т. Это может быть связано с наличием недораскрытого золота в данных классах крупности.

Далее хвосты, полученные после 1-й стадии гравитации, доизмельчались в лабораторной шаровой мельнице (см. рис. 2) до 80 % класса крупности $-0,315$ мм и являлись питанием для 2-й стадии гравитации на ИТОМАКе.

Из данного продукта отобрана навеска весом 1000 г для расситовки и отбора для пробирного анализа на содержание золота. Результаты анализов и распределение золота представлены в табл. 10.

Как видно по представленным в табл. 10 результатам, после измельчения хвостов 1-й стадии гравитационного обогащения до крупности 80 % класса $-0,315$ мм остаточное содержание золота в хвостах первой стадии концентрации перераспределяется равномерно по классам крупности. Содержание золота колеблется от 3,44 (класс $-0,5+0,315$ мм) до 6,66 г/т (для класса $-0,1+0,071$ мм). Наибольшее значение доли перераспределённого золота наблюдается для классов $-0,2+0,1$ и $-0,071$ мм – 26,19 и 25,79 % соответственно.

Измельченные хвосты направлялись на 2-ю стадию гравитационного обогащения на концентрате ИТОМАК. С получением концентрата массой 2,210 кг и хвостов массой 57,117 кг. Полученные продукты подверглись гранулометрическому анализу по классам крупности: $+0,315$ мм; $-0,315+0,2$ мм; $-0,2+0,1$ мм; $-0,1+0,071$ мм; $-0,071$ мм. Анализ содержания золота проводился для каждого класса крупности каждого полученного продукта. Результаты представлены в табл. 11.

По представленным в табл. 11 данным видно, что распределение золота в концентрате крупностью $-0,071$ мм составляет 38,33 %, при этом распределение золота в хвостах приходится на класс крупности $-0,2+0,1$ мм и составляет 30,98 %. Это связано с определённой упорностью руды по раскрытию золота, так же как в случае с дроблением руды до крупности -1 мм, измельчение до $-0,315$ мм не раскрыло значительную часть золота, присутствующего в руде.

Хвосты, полученные после 2-й стадии гравитации, измельчали на лабораторной шаровой мельнице до 88 % класса крупности $-0,071$ мм. Так же как и в случае с питанием 2-й гравитации на ИТОМАКе, измельченные хвосты являлись питанием 3-й гравитации на ИТОМАКе. От измельченных хвостов отбиралась проба массой 517 г и подвергалась гранулометрическому анализу. Для каждого полученного класса крупности проводился анализ содержания золота. Результаты представлены в табл. 12.

Как видно из табл. 12, после измельчения хвостов 2-й стадии гравитационного обогащения до 88 % крупности $-0,071$ мм основная часть золота (89,27 %) переходит в класс крупности $-0,071$ мм.

Таблица 10

Гранулометрический состав и содержание золота измельченных хвостов 1-й стадии гравитации на концентрате ИТОМАК

Класс крупности, мм	Выход, %	Масса, г	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %
$-0,5+0,315$	20,00	12065,4	3,44	14,24
$-0,315+0,2$	17,10	10315,917	4,40	15,58
$-0,2+0,1$	26,80	16167,636	4,72	26,19
$-0,1+0,071$	13,20	7963,164	6,66	18,20
$-0,071+0$	22,90	13814,883	5,44	25,79
Итого	100	60327	4,83	100,00

Таблица 11

Результаты второй стадии GRG-теста

Класс крупности, мм	Концентрат				Хвосты			
	Выход, %	Масса, г	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %	Выход, %	Масса, г	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %
$-0,5+0,315$	12,66	279,79	12,7	4,71	5,54	3164,28	4,56	4,73
$-0,315+0,2$	32,97	728,64	21,1	20,38	18,90	10795,11	7,80	27,58
$-0,2+0,1$	38,30	846,43	23,2	26,03	29,05	16592,49	5,70	30,98
$-0,1+0,071$	8,92	197,13	40,4	10,56	16,43	9384,32	4,40	13,53
$-0,071+0$	7,15	158,02	183	38,33	30,08	17180,79	4,12	23,19
Итого	100	2210	34,14	100	100,00	57117,00	5,34	100



Измельченные хвосты отправлялись на 3-ю стадию гравитационного обогащения на концентрате ИТОМАК. Получен концентрат массой 1,479 кг и хвосты массой 55,121 кг. Анализ содержания золота проводился для каждого класса крупности каждого полученного продукта. Результаты представлены в табл. 13.

В табл. 14 представлены сводные результаты теста GRG по трем стадиям гравитации на ИТОМАКе.

По данным табл. 13 видно, что максимальное содержание золота в концентрате в классе крупности $-0,071$ мм, а минимальное значение содержания золота – в хвостах, при этом распределение золота в концентрате и в хвостах практически одинаковое, максимальное значение которого приходится на нижний класс $-0,071$ мм.

В целом качество исходной руды подтверждается проведенным тестом 8,44 г/т, что соответствует зна-

чению для данной пробы №1 (канавы 500), полученному в результате сквозной обработки пробы.

Наиболее высокие показатели извлечения золота получены на 1-й стадии гравитационного обогащения (дробленой руды до класса крупности -1 мм), где в концентрат извлечено 40,20% раскрытого свободного золота, причем 38,68% из них представлено классом крупности $-0,071$ мм. Это указывает на то, что содержащееся в руде золото в основном представлено мелкими свободными частицами золота крупностью менее 71 мкм, что подтверждается результатами испытаний, представленными в табл. 9.

При измельчении хвостов 1-й стадии до 80% крупностью $-0,315$ мм удалось дополнительно извлечь в концентрат 14,46% раскрытого золота, которое в основном представлено также классом крупности $-0,071$ мм и составляет 38,33% (см. табл. 11).

Таблица 12

Гранулометрический состав и содержание золота измельченных хвостов 2-й стадии гравитации на концентрате ИТОМАК

Классы крупности, мм	Выход, %	Масса, г	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %
$-0,1+0,071$	12,00	6792	4,00	10,73
$-0,071+0$	88,00	49808	4,54	89,27
Итого	100	56600	4,48	100,00

Таблица 13

Результаты третьей стадии GRG-теста

Класс крупности, мм	Концентрат				Хвосты			
	Выход, %	Масса, г	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %	Выход, %	Масса, г	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %
$-0,1+0,071$	32,14	475,35	35,40	16,19	11,46	6316,87	2,32	11,29
$-0,071+0$	67,86	1003,65	86,80	83,81	88,54	48804,13	2,36	88,71
Итого	100	1479	70,28	100,00	100	55121,00	2,36	100

Таблица 14

Сводная таблица результатов GRG-теста

Продукт	Выход, %	Масса, г	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %
1-я стадия 100% класса -1 мм				
Концентрат 1	4,03	2573,00	84,24	40,20
Хвосты 1	95,97	61327,00	5,26	59,80
Питание (руда)	100,00	63900,00	8,44	100,00
2-я стадия 80% класса $-0,315$ мм				
Концентрат 2	3,73	2210	34,14	19,82
Хвосты 2	96,27	57117	5,34	80,18
Питание (хвосты 1)	100	59327	6,42	100,00
3-я стадия 88% класса $-0,071$ мм				
Концентрат 3	2,61	1479	70,28	44,46
Хвосты 3	97,39	55121	2,36	55,54
Питание (хвосты 2)	100	56600	4,13	100,00
Итого				
Концентрат 1	4,19	2573,00	84,24	38,57
Концентрат 2	3,60	2210,00	34,14	14,46
Концентрат 3	2,41	1479,00	70,28	20,88
Хвосты 3	89,80	55121,00	2,36	26,08
Питание (руда)	100,00	61383,00	8,79	100,00



При измельчении хвостов 2-й стадии до 88 % крупности $-0,071$ мм доизвлечено в концентрат 20,88 % раскрытого золота, которое также в основном находится в классе крупности $-0,071$ мм и составляет 83,81 % (см. табл. 13).

Таким образом, результаты стандартного GRG-теста показали следующее: из руды, дробленной до крупности 100% класса -1 мм, в концентрат извлекается 38,57 % золота; из хвостов 1-й стадии после доизмельчения до 80 % класса $-0,315$ мм в концентрат извлекается 14,46 %.

Суммарное извлечение в гравитационный концентрат, полученный после первой и второй стадий измельчения, составило 53,03 %. Измельчение хвостов 2-й стадии гравитации до крупности 88 % класса $-0,071$ мм позволило дополнительно получить гравитационный концентрат 3, содержащий 70,28 г/т золота при извлечении 20,88 %. Суммарное извлечение золота в трех гравитационных концентратах (1 + 2 + 3) составило 73,91 %.

Обсуждение результатов испытаний

В предоставленных для исследования пробах руды месторождения Аркачан в результате обработки и балансовых расчётов уточнено содержание в пробе №1 (канавы 500) – 7,95 г/т и №2 (канавы 600) – 11,28 г/т.

Качество руды по содержанию золота в испытуемых пробах высокое, однако в отличие от данных геологического отчёта полидисперсность золота не подтверждается, т.е. речь идёт только о дисперсном золоте крупностью менее 100 мк или вкрапленном предположительно в пирите. Для данной руды существующая технология сухого обогащения является малоэффективной, так как применяемая технология сухого измельчения в ступенчатой центробежной мельнице не раскрывает такое дисперсное золото, а также процесс пневмосепарации в недостаточной степени обогащает, несмотря на то что наблюдается процесс раскрытия золота и перераспределение его в мелкие классы крупности.

Для детального изучения возможности пневматического сухого обогащения руды требуются более тщательные исследования после тонкого измельчения не на уровне валовых испытаний, а на уровне лабораторных исследований.

Обработка продуктов разделения гравитационными методами обогащения показывает возможность извлечения золота, для этого требуется высокая степень измельчения до 80 % крупностью $-0,071$ мм. Данное положение подтверждается ранее проведёнными исследованиями GRG-теста ЦНИГРИ.

Выводы

В результате проведения исследовательских работ по обработке рудных проб месторождения Аркачан на предмет использования технологии сухого обогащения с целью получения высококонцентрированных золотосодержащих продуктов предварительного разделения установлено, что:

- экспериментальными исследованиями и балансовыми расчётами определено содержание золота в представленных пробах: в пробе №1 (канавы 500) – 7,95 г/т и №2 (канавы 600) – 11,28 г/т, при этом золото в пробах представлено в тонкодисперсном виде (менее 100 мк) и ассоциированное в минеральные формы, предположительно в пирите;

- исследования процесса дробления в ДКД-300 в циклическом режиме показывают достаточно высокий результат по степени дробления в исходной пробе руды: для пробы №1 (канавы 500) в первом цикле – 9,35, во втором – 2,28, в третьем – 2,02; для пробы №2 (канавы 600) значения степеней дробления 9,23, 2,89 и 2,16 в соответствующих циклах;

- исследования процесса измельчения в центробежной мельнице ЦМВУ-800 продуктов дробления -5 мм показали, что оно в целом эффективно для получения основной массы руды фракцией -1 мм в два цикла, суммарный выход контрольного класса крупности $-0,071$ мм для класса крупности $-5+3$ мм составляет 27,5 %, для класса крупности $-3+1$ мм – 16,2 %, что соответствует показателям общепринятого грубого измельчения;

- раскрываемость сростков золота подтверждается перераспределением и избирательной концентрацией его в классы -3 мм в процессах дробления со степенью концентрации – 1,51 для пробы №2 (канавы 600) и для пробы №1 (канавы 500) – 1,52, а также перераспределением золота в классы $-0,071$ мм в процессах измельчения и при проведении GRG-теста;

- обогащения золота пневматической сепарацией на ПОС-2000 из-за грубого измельчения на центробежной мельнице ЦМВУ-800 не происходит;

- проведённый GRG-тест показывает, что для более приемлемых условий гравитационного обогащения золота – до 73,91 % – необходима степень измельчения до 80 % класса $-0,071$ мм для получения гравитационного концентрата с содержанием 70,28 г/т золота;

- реализация сухого обогащения применительно к рудам месторождения Аркачан технологически неэффективна. Требуются дополнительные лабораторные исследования процессов пневмосепарации при высокой степени измельчения рудных материалов.

Список литературы / References

1. Юсупов Т.С. Совершенствование процессов раскрытия минеральных сростков при освоении труднообогатимых объектов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2016;(3):143–149. (Перев. вер.: Yusupov T.S. Improvement of dissociation of rebellious minerals. *Journal of Mining Science*. 2016;52(3): 559–564. <https://doi.org/10.1134/S1062739116030825>)
Yusupov T.S. Improvement of dissociation of rebellious minerals. *Journal of Mining Science*. 2016;52(3):559–564. <https://doi.org/10.1134/S1062739116030825> (Orig. ver.: Yusupov T.S. Improvement of dissociation of rebellious minerals. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2016;(3):143–149. (In Russ.))



2. Sotoudeh F., Nehring M., Kizil M.S., Knights P. Integrated underground mining and pre-concentration systems; a critical review of technical concepts and developments. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2020;35(3):153–182. <https://doi.org/10.1080/17480930.2020.1782573>
3. Lakshmanan V.I., Ojaghi A., Gorain B. Beneficiation of gold and silver ores. In: Lakshmanan V., Gorain B. (eds) *Innovations and Breakthroughs in the Gold and Silver Industries*. Springer, Cham; 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32549-7_4
4. Левданский Э.И., Левданский А.Э., Гарабажиу А.А. Энергосберегающие роторно-центробежные мельницы для измельчения сыпучих и кусковых материалов. В: *Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности. Материалы Международной научно-технической конференции*. Мн.: БГТУ; 1998. С. 36–38.
Levdanskii E.I., Levdanskii A.E., Garabagiu A.A. Energy-saving rotor-centrifugal mills for the grinding of bulk and lumpy materials. In: *Resource- and energy-saving technologies in the Chemical and Petrochemical Industry. Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Minsk: BSTU; 1998. Pp. 36–38. (In Russ.)
5. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкции, расчет, особенности эксплуатации. М.: Машиностроение; 1990. 320 с.
Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. Crushers. *Designs, calculation, peculiarities of operation*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1990. 320 p. (In Russ.)
6. Ревнивцев В.И., Гапонов Г.В., Зарогатский Л.П. и др. Селективное разрушение минералов. Под ред. В.И. Ревнивцева. М.: Недра; 1988. 285 с.
Revnitsev V.I., Gaponov G.V., Zarogatsky L.P. et al. *Selective desintegration of minerals*. Revnitsev V.I. (Eds.) Moscow: Nedra Publ.; 1988. 285 p. (In Russ.)
7. Львов Е.С., Матвеев А.И. Изучение формирования гранулометрического состава и раскрытия минералов при дроблении руд с использованием дробилки многократного динамического действия ДКД-300. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(10):112–116.
L'vov E.S., Matveev A.I. Studying the formation of particle size distribution and disclosure of minerals in ore crushing mill using multiple dynamic action DCD-300. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2014;(10):112–116. (In Russ.)
8. Матвеев А.И., Львов Е.С., Осипов Д.А. Обоснование применения дробилки комбинированного ударного действия ДКД-300 в схеме сухого обогащения кимберлитовых руд трубки «Зарница». *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2013;(4):107–115.
Matveev A.I., L'vov E.S., Osipov D.A. Use of the combined impact crusher DKD-300 in the dry concentration scheme at Zarnitsa kimberlite pipe. *Journal of Mining Sciences*. 2013;(4):107–115. (In Russ.)
9. Матвеев А.И., Львов Е.С., Заикина А.В. Особенности раскрытия механического разрушения золото-содержащих руд месторождения Гурбей ударными динамическими воздействиями. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2021;(2):141–151.
Matveev A.I., L'vov E.S., Zaikina A.V. Dissociation of gold ore from Gurbey deposit under impact effects. *Journal of Mining Sciences*. 2021;(2):141–151. (In Russ.)
10. Матвеев А.И., Львов Е.С. Разработка методики определения степени дезинтеграции геоматериалов в процессе многократного ударного дробления. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2020;(2):137–143.
Matveev A.I., L'vov E.S. Disintegratability procedure for geomaterials in multiple impact crushing. *Journal of Mining Sciences*. 2020;(2):137–143. (In Russ.)
11. Nunna V., Hapugoda S., Eswarappa S.G. et al. Evaluation of dry processing technologies for treating low grade lateritic iron ore fines. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2022;43(3):283–299. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1837127>
12. Tripathy S.K., Banerjee P.K., Suresh N. et al. Dry high-intensity magnetic separation in mineral industry – a review of present status and future prospects. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2017;38(6):339–365. <https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1323743>
13. Chelgani S.Ch., Neisiani A.A. *Dry mineral processing*. Springer Cham; 2022. 156 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-93750-8>
14. Shishkin S.F., Dzyuzer V.Ya., Shishkin A.S. Air Classification of Sands for the Glass Industry. *Glass and Ceramics*. 2001;58(11):370–373. <https://doi.org/10.1023/A:1014997923206>
15. Суримбаев Б.Н., Каналы Е.С., Болотова Л.С., Шалгымбаев С.Т. Оценка гравитационной обогатимости золотосодержащей руды – GRG. *Горные науки и технологии*. 2020;5(2):92–103. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-92-103>
Surimbayev B.N., Kanaly E.S., Bolotova L.S., Shalgymbayev S.T. Assessment of gravity dressability of gold ore – GRG test. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(2):92–103. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-92-103>
16. Брошо С. Отбор проб для металлургических исследований: как результаты GRG теста могут быть использованы для оценки уровня их достоверности. В: *Труды конференции IMPC XXVIII*. г. Квебек, Канада, Сентябрь 2016. Конференц-центр Квебек-Сити, Квебек-Сити, Канада.



- Brochot S. Sampling for metallurgical test: how the test results can be used to estimate their confidence level. In: *XXVIII International Mineral Processing Congress*. September 11–15, 2016. Québec City Convention Center, Québec City, Canada.
17. Мырзалиев Б.М., Ногаяева К.А., Молмакова М.С. Определение целесообразности гравитационного обогащения руды месторождения Джамгыр. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(10):153–165. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-153-165>
 - Myrzaliyev B. M., Nogaeva K. A., Molmakova M. S. Determination of Jamgyr deposit ore gravity concentration feasibility. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(10):153–165. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-153-165>
 18. Koppalkar S., Bouajila A., Gagnon C., Noel G. Understanding the discrepancy between prediction and plant GRG recovery for improving the gold gravity performance. *Minerals Engineering*. 2011;24(6):559–564. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.09.007>
 19. Laplante A. R. *A Standardized Test to Determine Gravity Recoverable Gold*. 2000. Available from: <http://knel-onrussian.xplorex.com/sites/knelsongravity/files/reports/report21s.pdf> [Accessed: 07.03.2020].
 20. Laplante A. R., Dunne R. C. The Gravity recoverable gold test and flash flotation. In: *Proceeding 34th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*. January 22–24, 2002. Ottawa, Canada. Available from: <http://seprosys-tems.com/language/wp-content/uploads/2016/09/laplante.pdf> [Accessed: 10.03.2020].
 21. Суримбаев Б., Болотова Л., Есенгараев Е., Мазяркина Л. Исследование гравитационного обогащения золотосодержащих руд месторождения «Райгородок». *Промышленность Казахстана*. 2017;101(2):40–42.
 - Surimbayev B., Bolotova L., Esengaraev E., Mazyarkina L. The study of gravity separation of gold-bearing ores of the Raigorodok deposit. *Industry of Kazakhstan*. 2017;101(2):40–42 (In Russ.)

Информация об авторах

Андрей Иннокентьевич Матвеев – доктор технических наук, заведующий лабораторией, Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-4298-5990](https://orcid.org/0000-0002-4298-5990); e-mail andrei.mati@yandex.ru

Иван Феликсович Лебедев – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-1116-8872](https://orcid.org/0000-0003-1116-8872); e-mail ivleb@mail.ru

Василий Романович Винокуров – научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-5698-7922](https://orcid.org/0000-0001-5698-7922); e-mail vaviro@mail.ru

Евгений Степанович Львов – научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-3843-0714](https://orcid.org/0000-0002-3843-0714); e-mail lvoves@bk.ru

Information about the authors

Andrey I. Matveev – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, Federal Research Center “Yakutsk Research Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” N.V. Chersky North Mining Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0002-4298-5990](https://orcid.org/0000-0002-4298-5990); e-mail andrei.mati@yandex.ru

Ivan F. Lebedev – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Federal Research Center “Yakutsk Research Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” N.V. Chersky North Mining Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0003-1116-8872](https://orcid.org/0000-0003-1116-8872); e-mail ivleb@mail.ru

Vasiliy R. Vinokurov – Researcher, Federal Research Center “Yakutsk Research Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” N.V. Chersky North Mining Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0001-5698-7922](https://orcid.org/0000-0001-5698-7922); e-mail vaviro@mail.ru

Evgenii S. Lvov – Researcher, Federal Research Center “Yakutsk Research Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” N.V. Chersky North Mining Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0002-3843-0714](https://orcid.org/0000-0002-3843-0714); e-mail lvoves@bk.ru

Поступила в редакцию 11.10.2023
Поступила после рецензирования 01.02.2024
Принята к публикации 15.02.2024

Received 11.10.2023
Revised 01.02.2024
Accepted 15.02.2024