

УДК 622.7; 539.42; 539.422.224

**ОСОБЕННОСТИ РАСКРЫТИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД
МЕСТОРОЖДЕНИЯ “ГУРБЕЙ” УДАРНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ**

А. И. Матвеев¹, Е. С. Львов¹, А. В. Заикина²

¹*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,
E-mail: andrei.mati@yandex.ru, lvoves@bk.ru, просп. Ленина, 43,
677007, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия*
²*ООО “ТЕСКАН”, E-mail: Arina.Zaikina@tescan.ru,
Гражданский проспект, 11, 195220, г. Санкт-Петербург, Россия*

Выполнены экспериментальные исследования по раскрытию золотых частиц в процессе механического разрушения рудных проб месторождения “Гурбей” в дробилке ДКД-300, использующей принцип многократного ударного воздействия. Установлено, что при механическом разрушении золотосодержащей кварцевой руды сланцевой структуры раскрывается до 47 % гравитационно-извлекаемого золота крупностью более 100 мкм. Результаты исследований подтверждены автоматизированным минералогическим анализом на сканирующем электронном микроскопе TESCAN TИМА.

Разрушение, дробилка, раскрытие, сканирование, рентген, гранулометрический состав, золото

DOI: 10.15372/FTPRPI20210215

Разрушение геоматериалов — сложный физический процесс, зависящий от вида и параметров механического нагружения, а также физико-механических свойств и структурных особенностей геоматериала. Разрушение в начальной стадии происходит на микроскопическом уровне с образования микротрещин в месте контакта разрушающего элемента с объектом и сопровождается ростом, а затем разрывом связей, прежде всего межминеральных, составляющих геоматериалы минеральных компонентов. Макроскопическое разрушение характеризуется развитием одной или множества микроскопических трещин, нарушающих целостность объекта в значительных объемах [1 – 7].

В классическом виде разрушение геоматериалов можно наблюдать в процессах рудоподготовки перед обогащением. Главная задача — максимальное раскрытие мономинеральных зерен, что достигается в области микроуровней при измельчении. Технологическая последовательность рудоподготовки происходит от макро- до микроуровня: вначале грубое разрушение на стадиях дробления до 5 мм, затем измельчение в специальных аппаратах. Разрушение на микроуровне сопровождается макроразрушением, являясь его причинным источником, следовательно, раскрытие мономинеральных зерен осуществляется во всех стадиях рудоподготовки, независимо от применяемого способа и глубины разрушения. Это явление определяется как избирательное раскрытие тех или иных минеральных компонентов вследствие селективного характера разрушения сложных по составу и текстуре горных пород.

В [8–10] показано, что ударный (динамический) способ разрушения — наиболее рациональный способ для предварительной подготовки материала перед обогащением и имеет ряд преимуществ по степени дробления, энергоемкости и раскрытию полезных компонентов. Разрушение материала при динамическом механическом воздействии в аппаратах дробления и измельчения происходит посредством сообщения суммарного ударного импульса от рабочих органов аппаратов к разрушаемому кусковому геоматериалу. Образование микротрещин в зоне непосредственного контакта путем мгновенной объемной передачи напряжений по механическим связям всего материала приводит к макроскопическому его разрушению. Определены условия интенсификации процессов ударного дробления и измельчения, которые позволяют обеспечить многократные динамические воздействия на кусковые геоматериалы в рабочей зоне разрушения новых аппаратов [11]. Основная цель — не только сокращение крупности дробимого материала, а максимально возможное раскрытие полезного компонента от пустой породы, происходящее в режиме дезинтеграции по наиболее слабым интергранулярным и межминеральным связям сложных по текстуре рудных полиминеральных естественных комплексов (агрегатов) [12, 13].

В [14–16] описаны результаты испытаний различных руд в дробилке комбинированного ударного действия ДКД-300. Дробление осуществляется многократными динамическими воздействиями, при которых разрушение кусковых геоматериалов происходит как под действием рабочих органов, так и от взаимодействия (столкновения) кусков друг с другом. Для определения возможности ударного способа разрушения влиять на характер раскрытия полезного компонента — свободного золота проведены экспериментальные работы на примере золотосодержащей руды месторождения “Гурбей” Иркутской области в рамках тестирования технологии сухого обогащения. Настоящая работа является продолжением публикации результатов исследований, полученных с применением сканирующего электронного микроскопа TESCAN TIMA, (ООО “ТЕСКАН”).

Руда месторождения “Гурбей” представлена метаморфическими сланцами различного состава (преобладают биотит-кварцевые) с вкрапленной сульфидной минерализацией. Минеральный состав включает следующие минералы: пирротин (2.89 %) и пирит (0.94 %), а также титансодержащие соединения, преимущественно ильменит (1.98 %). В незначительном количестве (0.15 % в сумме) присутствуют гидроксиды железа, халькопирит и сфалерит. Коэффициент крепости исследуемой руды по шкале Протодяконова составил 6.16, что позволяет отнести ее к категории “довольно крепкие породы”.

В рудной мелочи имеется свободное раскрытое золото, поэтому для объективной оценки раскрываемости дробление проводилось после удаления из исходной пробы рудной мелочи грохочением. В данном случае при разделении по ячейке 12 мм получены классы –150+12 и –12 мм. Класс крупности –150+12 мм подвергали дроблению с использованием дробилки ДКД-300. Гранулометрический состав продуктов разрушения приведен на рис. 1.

Далее исследовалась количественная оценка раскрытия свободного золота из продуктов разрушения золотосодержащей руды. Согласно схеме обогащения руды (рис. 2), продукты дезинтеграции золотосодержащей руды в ДКД-300 поделили на две линии переработки для классов крупности –12+3 и –3 мм.

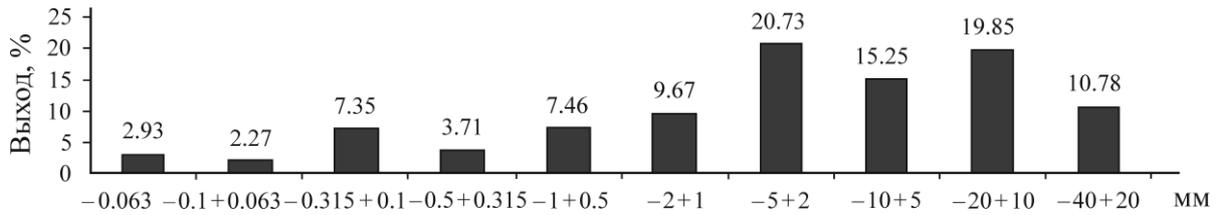


Рис. 1. Гранулометрический состав продуктов разрушения исходной руды крупностью $-150+12$ мм на дробилке ДКД-300

Во время испытания схемы сухого обогащения дробленые и измельченные продукты подвергались пневмосепарации в сепараторе ПОС-2000 с выделением двух продуктов — концентрата и хвостов. Из каждого продукта разделения методами гравитационного обогащения выделялись частицы свободного золота. Для этого продукты подвергались обогащению на концентрационном столе СКО-0.5. Полученный концентрат стола проходил перечистку на сепараторе Мозли, из которого затем выделялись золотые частицы в тяжелой среде (бромформ).

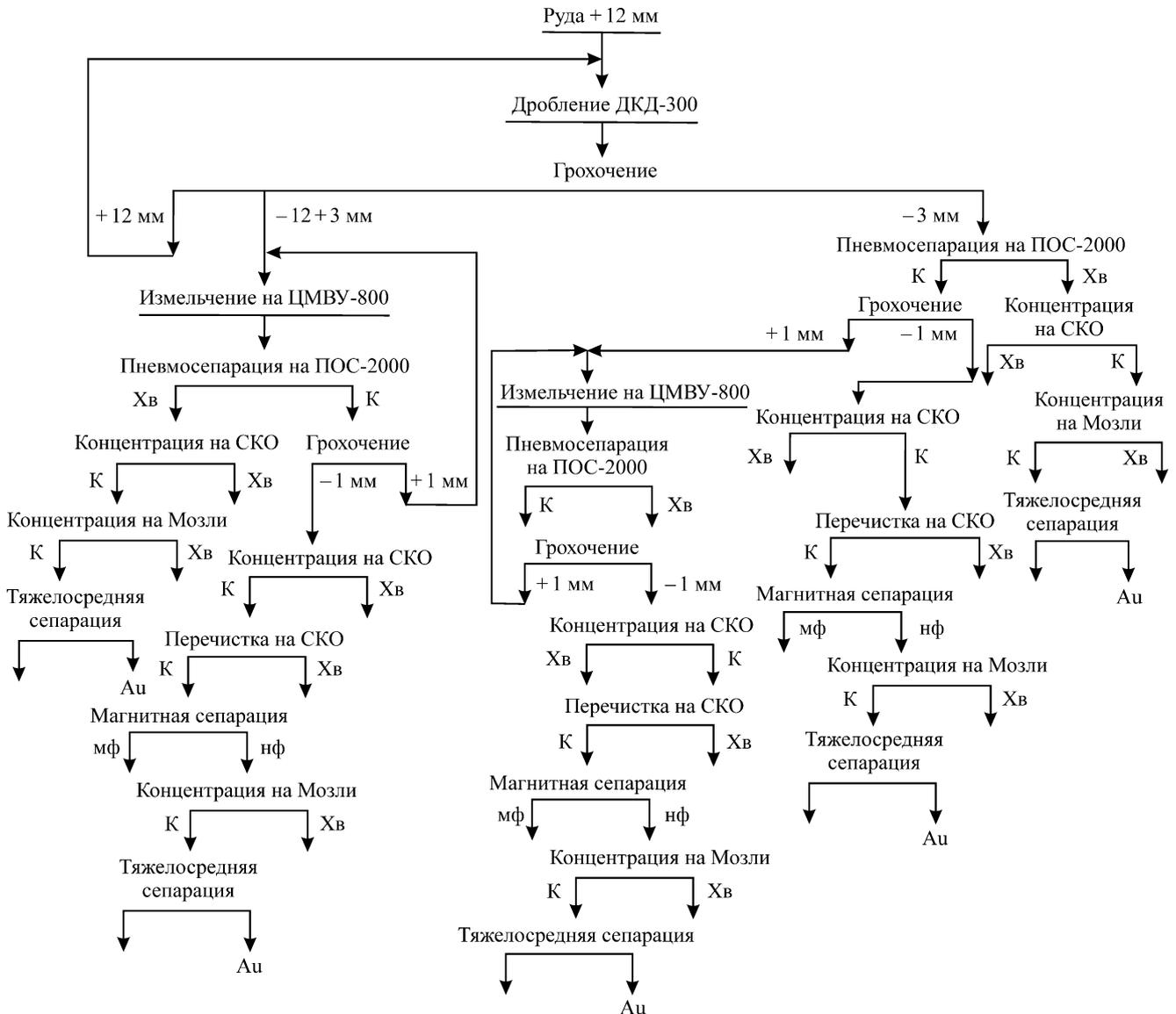


Рис. 2. Схема обогащения продуктов разрушения, полученных на дробилке ДКД-300: К — концентрат; Хв — хвосты; нф — немагнитная фракция; мф — магнитная фракция

В отличие от хвостов, в концентрат пневмосепаратора попадают зернистые фракции, в которых содержатся недораскрытые частицы золота и которые вскрываются доизмельчением материалов классов крупности + 1 мм и также извлекаются по аналогичной схеме. В качестве измельчителя использовался экспериментальный центробежный измельчитель многократного динамического воздействия ЦМВУ-800.

По схеме рис. 2 продукты дробления после грохочения + 12 мм возвращались на дробление, а класс – 12 + 3 мм подвергался четырехцикловому измельчению на центробежном измельчителе с последовательным выводом классов – 3 мм, из которых также извлекались вскрытые частицы золота. Таким образом, из исходной пробы руды полностью выделялось все раскрытое свободное золото, необходимое для количественной оценки раскрытого золота по процессам от общей доли, в частности после дробления.

В табл. 1 представлено распределение извлеченного свободного золота из разных продуктов обработки и их гранулометрический состав по расситовке. Видно, что при одном цикле дробления золотосодержащей руды в дробилке ДКД-300 раскрывается почти половина (47.19 %) гравитационно извлекаемого золота.

ТАБЛИЦА 1. Гранулометрический состав извлеченного свободного золота и его распределение по продуктам обработки

Продукт обогащения	Выход, %					Итого
	Класс крупности, мм					
	– 1 + 0.5	– 0.5 + 0.315	– 0.315 + 0.2	– 0.2 + 0.1	– 0.1 + 0	
Продукты дробления ДКД-300 – 1 мм	15.21	11.03	12.35	6.95	1.65	47.19
Продукты измельчения ЦМВУ продуктов дробления ДКД-300 + 1 мм	4.85	2.98	3.64	1.87	1.21	14.55
Продукты измельчения:						
– 12 + 3 мм 1 цикла	7.72	6.73	7.83	4.30	1.65	28.22
– 12 + 3 мм 3 цикла	0.55	0.66	0.88	0.44	0.22	2.76
– 12 + 3 мм 4 цикла	—	—	0.11	0.22	0.22	0.55
– 12 + 3 мм 2 цикла	1.32	1.32	1.76	0.77	0.44	5.62
Хвосты пневмосепарации:						
продуктов измельчения – 12 + 3 мм	—	—	—	—	0.33	0.33
продуктов дробления – 3 мм	—	—	—	—	0.77	0.77

Исходя из данных расситовки (гранулометрии) извлеченного золота, полученных при испытании, граница крупности практически вскрываемого золота находится в пределах 0.1 мм, что соответствует диапазону крупности полностью извлекаемого золота на концентрационном столе. Частицы меньше этого размера удалось извлечь частично. Для изучения характера раскрытия либо нахождения полезного компонента (золота) с размером частиц менее 0.1 мм в данных продуктах применялся автоматизированный минералогический анализ на сканирующем электронном микроскопе TESCAN TIMA.

Для раскрываемости частиц золота использовались результаты исследования двух проб, предоставленных ООО “ТЕСКАН”. Пробы — хвосты анализаторов минералов Мозли (операция пересортировки концентрата концентрационного стола СКО-0.5) после извлечения из них “золотой головки” — свободного золота. В хвостах высокая концентрация по содержанию мелко-

го и недораскрытого золота, что позволяет обнаружить их под микроскопом. Пробы отличаются друг от друга по содержанию остаточного мелкого и недораскрытого золота, определяемого качеством проведенной операции перемелывания (концентрации). Проба № 1 богаче пробы № 2. Минеральные составы анализировались на заранее подготовленных аншлифах. Алгоритм работы системы анализа TESCAN TИМА приведен на рис. 3.

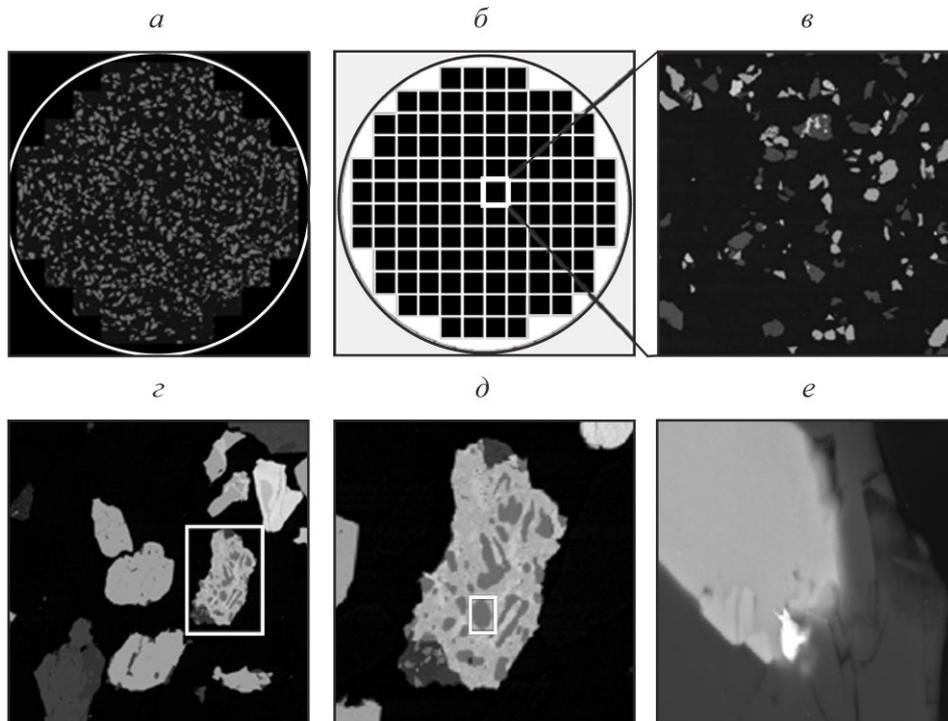


Рис. 3. Последовательность работы системы ТИМА на сканирующем электронном микроскопе TESCAN: *a* — аншлиф образца; *б* — поля; *в* — одно поле; *г* — частицы; *д* — одна частица с выделенным зерном; *е* — пиксель зерна

Всю площадь аншлифа образца (рис. 3*a*) система ТИМА разбивает на равновеликие поля (рис. 3*б*). Зона обследования микроскопа перемещается последовательно от поля к полю при соответствующем движении столика с образцами (рис. 3*в*). В каждом обследуемом поле (рис. 3*г*) определяются отдельные обломки породы, а при них отдельные зерна составных минеральных частиц (рис. 3*д*). В каждом зерне ТИМА формирует электронное изображение, состоящее из отдельных пикселей (рис. 3*е*), равных шагу сканирования электронного луча. С каждого пикселя ТИМА формирует рентгеновский спектр. При этом происходит идентификация минералов на основе анализа рентгеновских спектров, а не по яркости изображения. Существует много минералов, имеющих похожий уровень яркости на электронных изображениях, но принципиально разный состав и рентгеновские спектры. Благодаря полученным рентгеновским спектрам, прибор идентифицирует зерна разных минералов. На примере электронного изображения по яркости и рентгеновским спектрам (рис. 4) видно, что зерна пентландита и халькопирита на изображении по яркости почти не отличаются, но пики их интенсивности в спектрах явно разные (пики Cu, Fe, S в халькопирите и пики Ni, Fe, S в пентландите), поэтому идентификация по спектрам гораздо надежнее, чем по яркости.

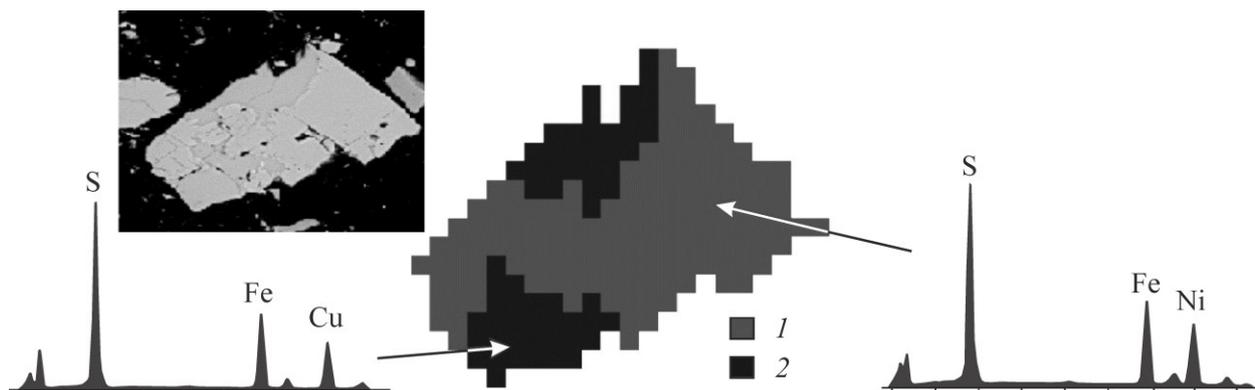


Рис. 4. Пример отличия минералов по рентгеновским спектрам: 1 — пентландит; 2 — халькопирит

Из двух проб изготовили по три реплики, таким образом общее количество исследуемых реплик равнялось шести. Сканирование проводилось в режиме поиска тяжелых фаз, когда сканируются не все зерна, а те, которые потенциально могут содержать благородные металлы. На электронных снимках искомые зерна выглядят белыми точками. Если белая точка найдена, то сканируется не только искомое зерно, но и его окружение для получения данных о том, с какими минералами ассоциированы эти тяжелые фазы. Параметры сканирования следующие:

Ускоряющее напряжение	25 кВ
Ток пучка электронов	4.35 нА
Шаг сканирования электронным зондом (размер 1 пикселя)	0.8 мкм
Диаметр отсканированного круга на поверхности аншлифа	26 мм
Количество X-Ray фотонов на каждом шаге электронного зонда	1000 шт.

В результате сканирования в пробе № 1 обнаружена 21 частица, содержащая 292 золотых зерна. В образцах пробы №2 обнаружено 7 частиц, содержащих 41 золотое зерно, что соответствует их качеству по концентрации. На рис. 5 представлены фрагменты изображения обнаруженных частиц, содержащих золотые зерна. Видно, что золотые зерна связаны с различными минералами. Количество обнаруженных зерен золота в общей массе раскрытых и ассоциированных с разными минералами в пробе № 1 представлено в табл. 2. Более половины массы найденных зерен золота приходится на весомый размер 92 – 123 мкм, составляя 50.43 %, при этом количество обнаруженных зерен всего 2. На оставшиеся 290 зерен приходится более 50 % массы. Наибольшее количество зерен имеют размерность 1.2 – 1.6 мкм и составляют 70 зерен.

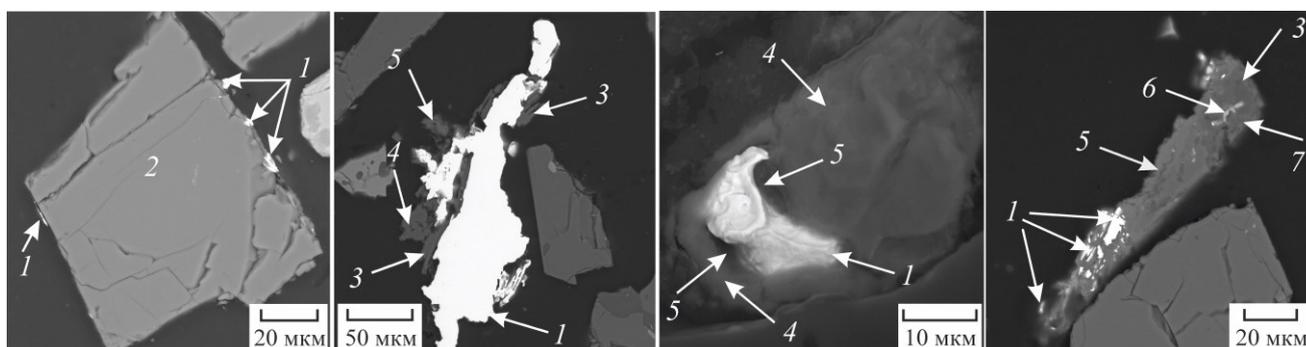


Рис. 5. Примеры изображения обнаруженных ассоциаций золотых зерен с минералами: 1 — золото; 2 — ставролит; 3 — мусковит; 4 — альбит; 5 — хлорит; 6 — оксид железа; 7 — кварц

ТАБЛИЦА 2. Распределение обнаруженных зерен золота пробы № 1

Диапазон размеров зерен, мкм	Количество зерен золота	Массовая доля золота, мас. %
≥ 0.9 < 1.2	37	0.06
≥ 1.2 < 1.6	70	0.25
≥ 1.6 < 2.1	28	0.19
≥ 2.1 < 2.9	42	0.52
≥ 2.9 < 3.8	21	0.45
≥ 3.8 < 5.1	23	0.75
≥ 5.1 < 6.8	25	1.83
≥ 6.8 < 9.1	13	1.51
≥ 9.1 < 12	10	2.14
≥ 12 < 16	7	2.77
≥ 16 < 22	4	2.62
≥ 22 < 29	4	4.67
≥ 29 < 39	2	4.25
≥ 39 < 52	2	9.32
≥ 52 < 69	1	7.36
≥ 69 < 92	1	10.89
≥ 92 < 123	2	50.43
Итого	292	100.00

В табл. 3 представлены ассоциации минералов с золотом, где массовая доля золота ассоциирована с тем или иным минералом с учетом нормирования на содержание данного минерала в образце. Анализ ассоциаций выполнялся на основании длины периметра, по которому соприкасаются минералы на аншлифе.

ТАБЛИЦА 3. Ассоциации минералов с золотом в пробе № 1

Минерал	Золото, % по массе	Золото, % по периметру (доля поверхности)
Авгит	47.9807	55.4724
Хлорит	17.1957	17.7086
Мусковит	15.1750	10.5909
Анортит	13.4844	8.1097
Альбит	2.5352	2.7523
Соединения железа	2.1592	1.8722
Кварц	0.7166	1.2716
Ильменит	0.2804	1.0499
Ставролит	0.2513	0.5779
Рутил	0.1784	0.4856
Ферросилит	0.0292	0.0447
Свободные зерна	0.0140	0.0643
Итого	100	100

Основная часть обнаруженного золота в пробе № 1 ассоциируется с авгитом (47.98 %), хлоритом (17.19 %), мусковитом (15.17 %) и анортитом (13.48 %). На остальные ассоциации минералов приходится ~ 6 % от общей массы найденного золота. В пробе № 2 заметно меньшее количество золотых зерен (41 зерно). Их максимальная размерность приходится на диапазон 23–43 мкм (1 зерно), составляя 63 % от общей массы обнаруженных в пробе золотых зерен (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Распределение обнаруженных зерен золота пробы № 2

Диапазон размеров зерен, мкм	Количество зерен золота	Массовая доля золота, мас. %
≥ 0.9 < 1.7	12	0.7546
≥ 1.7 < 3.3	7	1.3875
≥ 3.3 < 6.2	16	11.5703
≥ 6.2 < 12	3	8.2591
≥ 12 < 23	2	15.0089
≥ 23 < 43	1	63.0196
Итого	41	100

В пробе № 2 основная часть обнаруженного золота ассоциируется с рутилом (77 %) и кварцем (12 %), что характерно для бедного в минеральном отношении продукта разделения (табл. 5). Проба № 2 отличается наличием свободных частиц, составляющих 1.47 % от общей массы, по сравнению с пробой № 1, где свободных от ассоциаций минералов не более 0.014 %. Последнее очевидно, так как золото ассоциировано с менее плотными и более распространенными минералами легких фракций, свойственными для относительно бедного продукта.

ТАБЛИЦА 5. Ассоциации минералов с золотом в пробе № 2

Минерал	Золото, % по массе	Золото, % по периметру (доля поверхности)
Рутил	77.0892	57.2985
Кварц	12.3159	24.3086
Оксид хрома	4.5994	6.0888
Авгит	2.7399	5.6744
Хлорит	1.3349	2.7127
Полевой шпат	0.3981	0.8440
Соединения железа	0.0523	0.1835
Свободные частицы	1.4705	2.8896
Итого	100	100

Дальнейшем задачей исследований являлось определение степени раскрытия золотых зерен в хвостах обогащения продуктов разрушения ударной дробилки ДКД-300. Степень раскрытия вычислялась по площади свободной поверхности (доля площади, занимаемой зерном золота в пределах отдельной частицы, по отношению к общей площади частицы, в процентах). В данном случае площадь — это видимая площадь на аншлифе. Из табл. 6 видно, сколько полезного минерала высвобождается в каждом диапазоне степени раскрытия. Если золото всех трех реплик пробы № 1 принять за 100 % массы, то доля раскрытого золота составит 40 % и меньше. В пробе № 2 значительная часть обнаруженных золотых зерен (92.88 %) имеет лишь 10 % площади свободной поверхности. Зерна, имеющие более 90 % свободной площади, для пробы № 1 составляют 0.23 %, для пробы № 2 — 1.45 %.

ТАБЛИЦА 6. Раскрытие золота

Диапазон степени раскрытия по площади свободной поверхности, %	Массовая доля золота, мас. %	
	Проба № 1	Проба № 2
< 10	0.7015	92.8821
≥ 10 < 20	21.6381	0
≥ 20 < 30	47.2055	0
≥ 30 < 40	7.7700	0
≥ 40 < 50	0	0.3115
≥ 50 < 60	0	0
≥ 60 < 70	21.7692	0
≥ 70 < 80	0	0
≥ 80 < 90	0.6806	5.3523
≥ 90	0.2351	1.4541
Итого	100	100

ВЫВОДЫ

При механическом разрушении золотосодержащей сланцевой руды биотит-кварцевого состава в дробилке ДКД-300, использующей принцип многократного ударного воздействия, раскрывается до 47 % гравитационно извлекаемого золота крупностью > 100 мкм за одну стадию дробления. Это подтверждают проведенные инструментальные исследования с использованием электронного микроскопа ТЕСКАН системой анализа ТИМА. Показано, что в продуктах дробления частицы золота < 100 мкм раскрываются частично и сохраняют связанность в ассоциации с вмещающими минеральными компонентами руды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Протасов Ю. И. Теоретические основы механического разрушения горных пород. — М.: Недра, 1985. — 242 с.
2. Евсеев В. Д. Физика разрушения горных пород при бурении нефтяных и газовых скважин. — Томск: ТПУ, 2004. — 151 с.
3. Нескоромных В. В., Костин Ю. С. Теоретические основы механики разрушения и проектирования техники и технологии направленного бурения анизотропных горных пород. — Иркутск: ИрГТУ, 2000. — 220 с.
4. Керштейн И. М., Ключников В. Д., Ломакин Е. В., Шестериков С. А. Основы экспериментальной механики разрушения. — М.: МГУ, 1989. — 140 с.
5. Taylor D. The theory of critical distances applied to multiscale toughening mechanisms, J. Eng. Fract. Mech., 2019, Vol. 209. — P. 392–403.
6. Ефимов В. П. Особенности разрушения образцов хрупких горных пород при одноосном сжатии с учетом характеристик зерен // ГИАБ. — 2018. — № 2. — С. 18–25.
7. Ефимов В. П. Совершенствование технологии тонкого измельчения техногенного сырья на основе его дозированного стадийного разрушения // ГИАБ. — 2020. — № 4. — С. 29–3.
8. Газалеева Г. И., Цыпин Е. Ф., Червяков С. А. Рудоподготовка. Дробление, грохочение, обогащение. — Екатеринбург: ООО «УЦАО», 2014. — 914 с.

9. **Львов Е. С., Матвеев А. И.** Изучение формирования гранулометрического состава и раскрытия минералов при дроблении руд с использованием дробилки многократного динамического действия ДКД-300 // ГИАБ. — 2014. — № 10. — С. 112–116.
10. **Gorain K.** Innovative process development in metallurgical industry, *Physical Proc.: Innovations in Miner. Proc.*, 2015. — P. 9–65.
11. **Львов Е. С.** Определение особенностей дезинтеграции кусковых геоматериалов в процессе дробления с использованием динамических воздействий // ГИАБ. — 2018. — № 11. — С. 154–160.
12. **Матвеев А. И., Львов Е. С.** Разработка методики определения степени дезинтеграции геоматериалов в процессе многократного ударного дробления // ФТПРПИ. — 2020. — № 2. — С. 137–143.
13. **Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Каюмов А. А., Макавецкас А. Р., Фищенко Ю. Ю.** О влиянии структурных особенностей и характера взаимосвязи минералов на выбор способов разделения свинецсодержащих руд // ФТПРПИ. — 2018. — № 5. — С. 133–143.
14. **Пат. 2111055 РФ.** Дробилка комбинированного ударного действия / А. И. Матвеев, В. П. Винокуров, А. Н. Григорьев, А. М. Монастырев // Оpubл. в БИ. — 1998. — № 14. — С. 252.
15. **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” // ФТПРПИ. — 2013. — № 4. — С. 107–115.
16. **Матвеев А. И., Львов Е. С., Винокуров В. Р.** Новое в рудоподготовке — аппараты дробления и измельчения многократного ударного действия // ГИАБ. — 2016. — № 8. — С. 242–252.

Поступила в редакцию 03/II 2021

После доработки 05/III 2021

Принята к публикации 15/III 2021