

УДК 622.7

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ
МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СЕЛЕКТИВНОСТЬ
РАЗРУШЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ АССОЦИАЦИЙ**

Т. С. Юсупов¹, И. И. Бакшеева², В. И. Ростовцев²

¹*Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, E-mail: yusupov@igm.nsc.ru,
просп. Академика Коптюга, 3, 630090, Новосибирск, Россия*

²*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Исследовано влияние вида и энергетических характеристик механических воздействий на селективность разрушения сподуменовый руды при использовании дезинтегратора, вибрационной и шаровой мельниц на примере литиевого пегматита с содержанием металла 0.1%. Показано, что наиболее эффективным методом разрушения минеральных ассоциаций является дезинтеграторная обработка со свободным ударом. Анализом гранулометрического и химического состава и рентгенофазовыми исследованиями установлено преимущество дезинтеграторного процесса, состоящего в возможности повышения содержания и извлечения лития в концентрат, а также в снижении шламообразования.

Руда, минеральные ассоциации, измельчение, дезинтегратор, виброизмельчение, шаровая мельница, содержание, извлечение, концентрат, шламы, скорость соударения

Основное внимание исследователей в области измельчительной рудоподготовки в последние десятилетия направлено на селективное разрушение минеральных ассоциаций в тонковкрапленных труднообогатимых рудах. Решаемые при этом задачи включают раскрытие минералов по возможности в бóльшей крупности и минимизации их переизмельчения [1 – 3].

В связи с переходом к обогащению физически упорных руд и техногенного сырья, характеризующегося повышенной прочностью минеральных сростаний, их разрушение сопряжено с использованием более высоких энергетических воздействий, которые приводят к дефектообразованию в минералах с изменением их разделительных свойств. Возникает новое требование к разрушительным процессам — сохранение целостности кристаллической структуры [4].

Существенно усложняется данная проблема при раскрытии ценных компонентов в бедных рудах, когда содержание металлов в извлекаемых минералах составляет десятые и сотые доли процента. Из-за потерь при тонком измельчении в шаровых мельницах особо остро стоит вопрос снижения переизмельчения; в геологии подобные минералы называют аксессуарными и применительно к ним разрабатываются специальные технологии извлечения [5].

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект № 15-17-10017).

Другим обстоятельством, затрудняющим снижение переизмельчения, выступает близость разделительных свойств рудных и порообразующих минералов, исключающих предварительную концентрацию извлекаемых компонентов. Повышает шламообразование и потери целевого минерала абразивность сопутствующих компонентов. В связи с указанными обстоятельствами становится актуальным совершенствование процессов разрушения минералов в труднообогатимых бедных рудах.

Именно такой объект, представленный бедными сподуменовыми рудами Завитинского месторождения с содержанием 0.2 % Li_2O , явился предметом исследования. Данное месторождение, законсервированное в настоящее время, в период разработки содержало 0.6 % Li_2O , что в сравнении с однотипными рудами других стран считалось бедным. Несмотря на низкое содержание лития и сложность минерального состава, оно успешно обогащалось на Забайкальском ГОКе, полностью обеспечивая потребность страны в данном металле, а часть продукта даже экспортировалась в другие страны. Однако в новых экономических условиях эксплуатация месторождения оказалась нерентабельной. Россия стала импортировать литиевую продукцию.

В настоящее время остро стоит вопрос о восстановлении производства литиевых концентратов и продуктов их переработки. Ввиду отсутствия подготовленных к эксплуатации месторождений ведутся исследования по оценке обогатимости еще более бедных участков месторождения, что требует совершенствования селективности разрушения руды.

Состав и ориентировочное содержание минералов в изучаемой руде, определенные рентгенографическим методом на дифрактометре ДРОН-3 (излучение $\text{CuK}\alpha$), следующие: кварц, плагиооклаз и слюда — 15–20 %, микроклин — 10–15 %, хлорит — 2–3 %, а сподумен, целевой минерал исследований, — 1–2 % (рис. 1). Близкий минеральный состав характерен и для техногенного сырья, представленного хвостами обогащения данного месторождения [6].

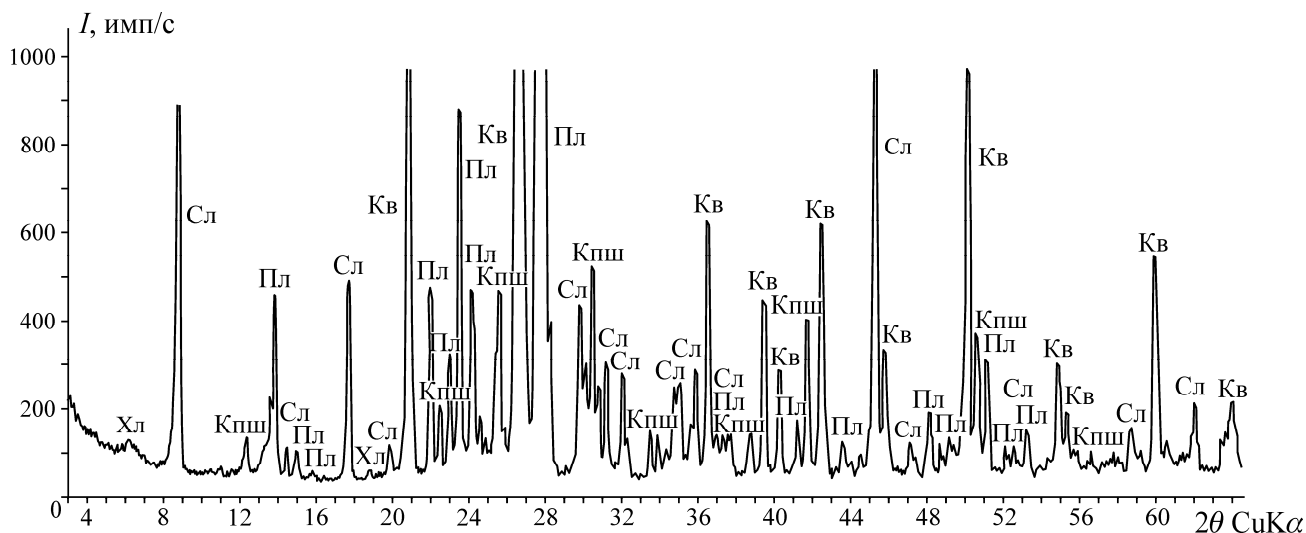


Рис. 1. Рентгенограмма исходного пегматита: Кв — кварц; Сл — слюда; Пл — плагиооклаз; Кпш — калиевый полевой шпат; Хл — хлорит; Сп — сподумен

В качестве основного аппарата селективного разрушения руды принят дезинтегратор. Для сравнения результатов измельченных продуктов проведена серия экспериментов с использованием вибрационной и шаровой мельниц.

Дезинтеграторному измельчению уделено особое внимание ввиду особенности разрушения материала, состоящей в свободном ударе с большой энергией бил о микронные частицы, что открывает большие перспективы его использования.

Виброизмельчение проводилось в сухом режиме с использованием виброистирателя производства Механобр. Выбор данной установки определен ее высокой энергонапряженностью, частота колебаний барабанов вибрационных мельниц равна числу вращений ротора электродвигателя 1500–3000 об/мин, вращательное движение передается барабану с измельчающей загрузкой через эксцентриковый вал. При вибрации роликов происходит интенсивное измельчение материала.

Измельчение пробы, так же как и в случае с барабанной мельницей, проводилось в стадийном режиме с четырехкратным отсевом фракции –0.16 мм и интервалом помола 10 с. В барабанной мельнице разрушение частиц достигается падением шаров с некоторой высоты под действием удара, раздавливания и истирания. Хотя основным фактором разрушения является удар, но в отличие от режима дезинтегратора, в шаровой мельнице осуществляется не свободный, а стесненный удар — обстоятельство, резко снижающее кинетическую энергию разрушения.

Использовалась лабораторная мельница с емкостью барабана 7 л, крупность исходного материала составляла –1.5+0.16 мм, диаметр стальных шаров — 22 мм, соотношение Т : Ж : Ш = 1 : 1 : 6, применялась водопроводная вода.

С целью повышения селективности разрушения измельчение проводилось в несколько стадий с отсевом фракции –0.16 мм через 15, 20 и 30 мин, полагая, что в данной крупности основная часть сподумена раскрывается. Измельченные продукты (класс –0.16 мм) объединялись, поступали на сушку и рассев с выделением фракций –0.16+0.1, –0.1+0.053 и –0.053 мм. Мерой энергетической эффективности измельчителей служила скорость соударений частиц в помольных устройствах (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Сравнение энергий соударений в различных мельницах

Тип мельницы	Формула для расчета скорости соударения V	Число оборотов ротора n , об/мин	V , м/с
Шаровая	$\sqrt{2gD}$	60	6
Вибрационная	$4\pi \cdot n \cdot a$	970	40
Дезинтегратор	$\pi \cdot n \cdot D$	5600	75
		6800	100
		8000	115

Примечание: g — гравитационное ускорение; D — диаметр мельницы; a — амплитуда.

Исходная руда с помощью щековой дробилки доводилась до крупности –1.5 мм и служила питанием дезинтегратора, вибрационной и барабанной мельниц, в которых материал измельчался до –0.16 мм. Наибольший выход продуктивного класса –0.16+0.02 мм получен после измельчения в дезинтеграторе при $V = 115$ м/с — 85.8 %, а наименьший — в барабанной мельнице 77.5 % при $V = 6$ м/с.

Более полная информация о грансоставе измельченных проб получена с помощью анализатора Microtrac ASVR (рис. 2).

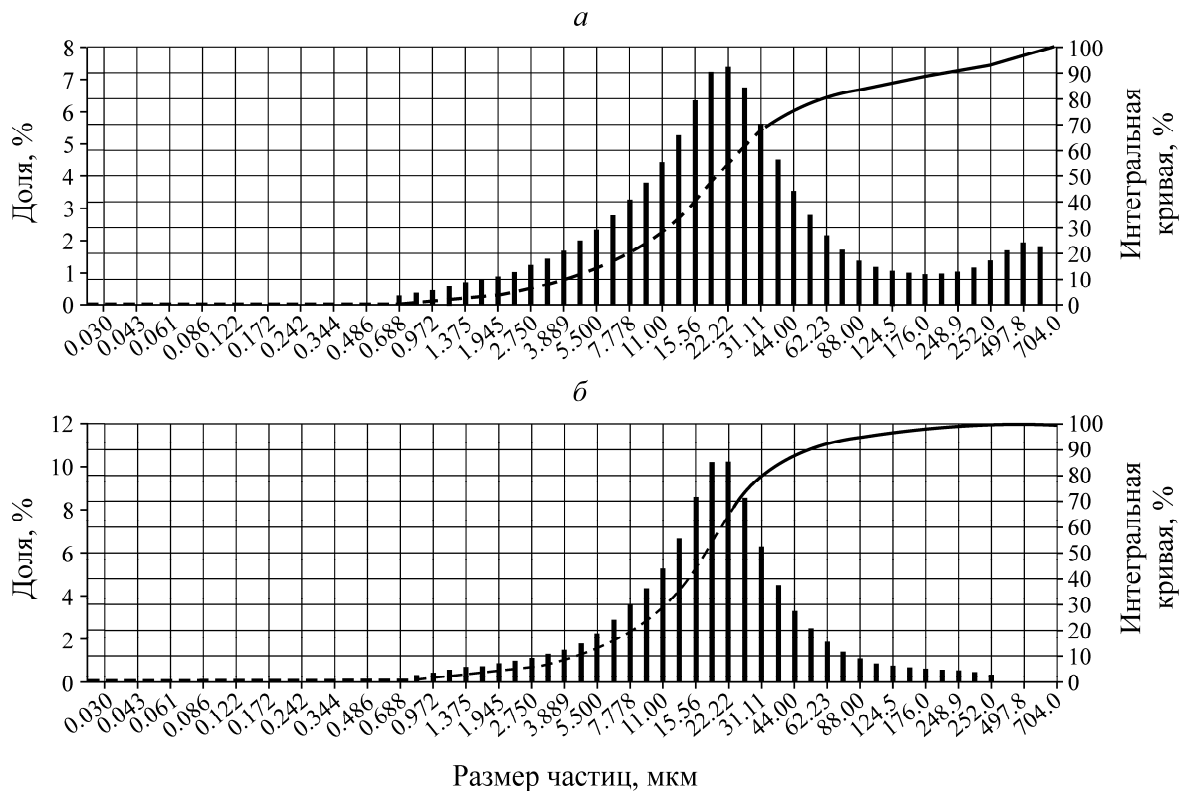


Рис. 2. Распределение частиц по объему при измельчении пробы: *a* — в шаровой мельнице; *б* — в дезинтеграторе

Результаты анализа показывают, что частицы, измельченные в дезинтеграторе, по сравнению с таковыми в шаровой мельнице отличаются большей однородностью, основная их крупность находится в пределах от 10 до 50 мкм и выход фракции составляет примерно 75 %. При шаровом измельчении указанный показатель не превышает 50 %, значительная доля частиц ~ 15 % сохраняется еще в недоизмельченном виде с размером \square 50 мкм, а доля переизмельченного материала < 10 мкм составляет около 30 %, после дезинтеграторного процесса данный показатель равен 20 %. Таким образом, установлено, что наиболее благоприятный продуктивный класс материала, используемый в обогащении, получается при измельчении в дезинтеграторе.

Продукты, измельченные в барабанной мельнице, вибрационном измельчителе и дезинтеграторе разделялись в тяжелой жидкости, бромформе ($d = 2.89 \text{ г/см}^3$), полученные фракции направлялись на химический и рентгенофазовый анализы.

Анализ содержания Li в продуктах разделения (табл. 2, 3) позволяет сделать следующие выводы:

- наибольшим содержанием и извлечением Li отличается тяжелая фракция руды, выделенная из продуктов дезинтеграторного измельчения при скорости ударов разрушающих элементов 75 м/с. Выход шламов и извлечение в них Li оказались наименьшими из сравниваемых показателей разрушения руды;

- увеличение скорости ударов частиц и бил до 115 м/с снижает селективность измельчения, хотя содержание лития в концентрате (тяжелая фракция) близко к значению в предыдущем опыте Li = 1.71 %, а извлечение металла в аналогичный продукт ниже на 17.08 %. По сравнению с предыдущим опытом, при меньшей скорости соударений частиц выход фракции $-0.02 + 0 \text{ мм}$ увеличился на 14.20 %, а извлечение лития в направляемый в отвал продукт возросло на 4.96 %;

— сравнительно высокими качественно-количественными показателями характеризуются продукты разделения после вибрационного измельчения. Полученный концентрат содержит 1.64% лития при извлечении 35.65%, что на 10.68% ниже аналогичного показателя при разрушении руды в дезинтеграторе. Однако вибрационное измельчение следует рассматривать в качестве эффективного метода при разрушении минералов повышенной твердости (\square 7 по шкале Мооса), в частности при додрабливании особо прочных компонентов данной руды, представленных неразрушенным остатком после дезинтеграторного процесса;

— результаты измельчения в барабанной мельнице существенно ниже показателей предыдущих экспериментов. Если содержание Li в тяжелой фракции составило 1.59%, что можно считать приемлемым для химической переработки концентрата [7], то извлечение металла значительно уступает показателям предыдущих экспериментов. Также велики потери металла со шламами — 20.15%, что в 2 раза выше данного значения в результате дезинтеграторного измельчения.

ТАБЛИЦА 2. Содержание Li в продуктах разделения сподуменового пегматита, подвергнутого разрушению измельчением в различных устройствах

Условие измельчения и скорость соударений	Класс крупности, мм	Характеристика продукта	Выход, %	Содержание Li, %	Извлечение Li, %
Исходная руда				0.082; 0.090	
Шаровое измельчение $V = 6$ м/с	0.16 + 0.02	Легкая фракция	77.5	0.079	66.12
		Тяжелая фракция	0.8	1.59	13.73
	– 0.02	Шламовая фракция	21.7	0.086	20.15
		Всего	100.0		100.0
Виброизмельчение $V = 40$ м/с	0.16 + 0.02	Легкая фракция	84.9	0.056	51.68
		Тяжелая фракция	2.0	1.64	35.65
	– 0.02	Шламовая фракция	13.1	0.089	12.67
		Всего	100.0		100.0
Дезинтегратор $V = 75$ м/с	0.16 + 0.02	Легкая фракция	85.8	0.052	43.62
		Тяжелая фракция	2.4	1.75	46.33
	– 0.02	Шламовая фракция	11.8	0.082	10.05
		Всего	100.0		100.0
Дезинтегратор $V = 115$ м/с	0.16 + 0.02	Легкая фракция	72.4	0.072	55.74
		Тяжелая фракция	1.6	1.71	29.25
	– 0.02	Шламовая фракция	26.0	0.054	15.01
		Всего	100.0		100

ТАБЛИЦА 3. Сравнительный анализ продуктов измельчения и разделения

Показатель обогащения, %	Условие измельчения		
	Дезинтегратор	Виброистиратель	Барабанная мельница
	при V , м/с		
	75	40	6
Содержание Li в концентрате	1.75	1.64	1.59
Извлечение Li в концентрате	46.33	35.65	13.73
Выход шламов	11.8	13.1	21.70
Извлечение Li в шламы	10.05	12.65	20.15

Таким образом, показатели химического анализа концентратов, выделенных из пробы дезинтеграторной рудоподготовки, свидетельствуют о более высокой селективности разрушения минералов при свободном ударном воздействии. Именно дезинтеграторное измельчение рассматривается в качестве перспективной технологии подготовки сложных геоматериалов к обогащению и специальному использованию [8–10].

Рентгенограмма тяжелой фракции руды, прошедшей дезинтеграторное разрушение, показывает, что выделенный продукт представляет собой литиевый концентрат с содержанием сподумена свыше 99%. Фазовый анализ выполнен на дифрактометре Д8 Advance (Bruker) с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения и одномерного детектора Lynx-Eye с никелевым фильтром, диапазон съемки 2θ 15–65° с шагом 0.02° и временем накопления 35 с (рис. 3).

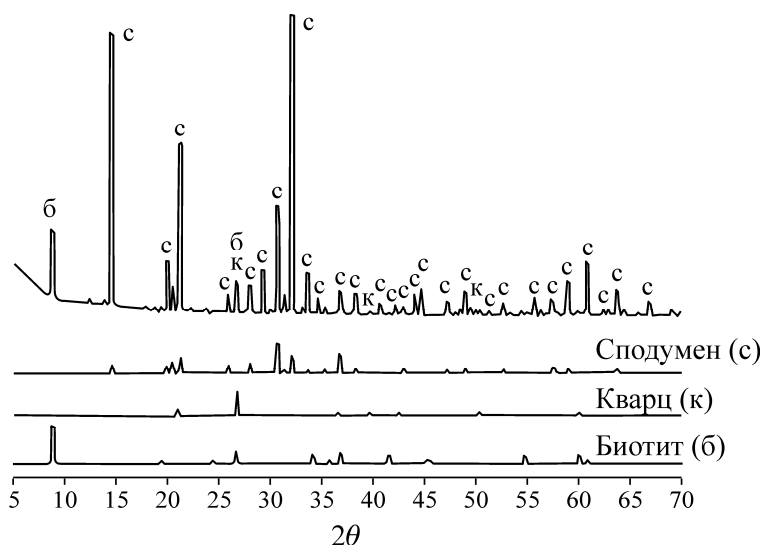


Рис. 3. Рентгенограмма сподуменового концентрата (тяжелая фракция)

Количество сподумена в легкой фракции, определенное расчетным путем, составляет 2%. Данные результаты — основа прогнозирования высоких показателей обогащения руды гравитационными и флотационными методами.

Легкая фракция представлена кварцем, альбитом, мусковитом и лепидолитом. Именно присутствие лепидолита определяет содержание в изучаемой фракции 0.05% лития при извлечении металла 43.62%. Следует отметить, что литий из большинства месторождений получают через сподуменовый концентрат, выделяемый из руды с применением флотационного метода [11]. Флотация слюды также относится к изученной области переработки руд, но разделение лепидолита от мусковита при небольшом содержании первого представляет собой сложную задачу и является предметом будущих исследований [12].

ВЫВОДЫ

Перспективы увеличения производства цветных, благородных и редких металлов во многом сопряжены с вовлечением в эксплуатацию так называемых проблемных руд, характеризующихся тонкой дисперсностью, тесным взаимопрорастанием и низким содержанием извлекаемых минералов в исходном и техногенном состоянии. Успех их разделения во многом определяется научно-техническим уровнем селективного разрушения минеральных ассоциаций и особенно сростков, отличающихся повышенной механической прочностью.

Широко используемые барабанные мельницы не справляются с данными задачами по ряду причин, но в первую очередь из-за недостаточной энергии разрушения. Селективное разрушение труднообогатимых руд с освобождением минералов должно осуществляться в измельчителях повышенных энергий и скоростей соударения частиц и разрушающих элементов мельниц.

Ввиду необходимости увеличения энергии разрушающих воздействий, выполнены экспериментальные исследования с использованием дезинтегратора, в котором разрушение происходит свободным ударом при скорости соударений 75 и 115 м/с, и виброизмельчителя, основными факторами механического воздействия которого являются раздавливание, истирание и сдвиг, скорость соударения в экспериментах составляла 40 м/с. Для сравнения серия опытов выполнялась в барабанной мельнице в водной среде при скорости соударений 6 м/с.

Наиболее высокими показателями селективности измельчения характеризуется дезинтеграторное разрушение со свободным ударным воздействием; особенно значительно его преимущество в увеличении извлечения металла в концентрат и в снижении этого показателя в шламовый продукт. Дезинтеграторное разрушение позволяет в 2 раза снизить выход шламов по сравнению с измельчением в барабанной мельнице.

Вибрационное измельчение значительно уступает по качественно-количественным показателям процессу в дезинтеграторе, однако в ряде случаев, в частности при разрушении сростков минералов с повышенной твердостью, применение вибромельниц следует считать эффективным и технологически оправданным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чантурия В. А.** Перспективы устойчивого развития горноперерабатывающей индустрии России // Горн. журн. — 2007. — № 2.
2. **Селективное разрушение минералов** / под ред. В. И. Ревнивцева. — М.: Недра, 1988.
3. **Вайсберг Л. А., Крупа П. Т., Баранов В. Ф.** Основные тенденции развития процессов дезинтеграции руд в XXI веке // Обогащение руд. — 2002. — № 3.
4. **Юсупов Т. С.** Совершенствование разделительных процессов на основе селективного измельчения руд // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосферы. Т. 1. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
5. **Акцессорные минералы** изверженных пород. — М.: Наука, 1963.
6. **Юсупов Т. С., Исупов В. П., Владимиров А. Г. и др.** Исследование вещественного состава и делимости минералов техногенного сырья с целью оценки возможности получения литиевых концентратов // ФТПРПИ. — 2014. — № 6.
7. **Widatallah H. M., Berry F. J.** The influence of mechanical milling and subsequent calcination on the formation of lithium ferrites, *J. Solid State Chem*, 2002, Vol. 164(2).
8. **Шадрунова И. В., Ожогина Е. Т., Колодежная Е. В., Горлова О. Е.** Оценка селективности дезинтеграции металлургических шлаков // ФТПРПИ. — 2013. — № 5.
9. **Гаркави М. С., Хрипачева И. С.** Смешанные цементы центробежно-ударного измельчения на основе доменного отвального шлака // Строит. материалы. — 2010. — № 8.
10. **Golik V. I., Komachshenko V. I., Drebenstedt K.** Mechanochemical activation of the ore and coal tailings in the desintegrators. *Bergbau*, 1047. DOI: 10. 1007/978-3-319-02678-7_107, Springer International Publishing Switzerland, 2013.
11. **Бочаров В. А., Игнаткина В. А.** Технология обогащения полезных ископаемых. — М.: Руда и металлы. — 2007. — Т. 1.
12. **Бергер Г. С.** Флотированность минералов. — М.: Госгортехиздат, 1962.

Поступила в редакцию 5/IX 2015