

УДК 622.7 + 621.926.47 + 553.87 + 542.22-162.25

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ  
ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ НА ОСНОВЕ ЕГО ДОЗИРОВАННОГО  
СТАДИЙНОГО РАЗРУШЕНИЯ**

**Ф. Х. Уракаев<sup>1</sup>, Л. Г. Шумская<sup>1</sup>, Е. А. Кириллова<sup>1</sup>, С. А. Кондратьев<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
E-mail: kondr@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Для повышения селективности измельчения и разрушения минеральных сростков литийсодержащего техногенного сырья рассмотрен принцип стадийного увеличения энергии разрушения. Установлено, что относительная частота оппозитного вращения роторов и число циклов пропусканий проб сырья через дезинтегратор позволяют оптимизировать выделение фракций заданного гранулометрического состава с минимальными потерями сподумена за счет сокращения процесса шламообразования. Разработана схема стадийной дезинтеграции техногенного сподуменсодержащего сырья для получения продукта флотационной крупности  $-0.16+0.02$  мм с минимальным выходом (6.0 %) шламовой фракции  $-0.02$  мм. Схема рудоподготовки подтверждена результатами флотационного обогащения.

*Техногенное сырье, сподумен, сростки, дезинтегратор, обогащение*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200519

Большую часть минерально-сырьевой базы России и зарубежных стран [1–4] составляют бедные, тонковкрапленные и труднообогатимые руды и техногенные образования, доля которых в настоящее время растет [4–8]. Для их эффективной переработки требуются новые подходы, позволяющие экономно и без экологического ущерба извлекать ценные компоненты. Развитие технологических основ переработки забалансовых руд с учетом приоритетности обеспечения промышленности стратегическими металлами (например, литием) — востребованный базисный компонент передовых технологий мира [9]. Несмотря на растущий спрос на литиевую продукцию из сподуменового сырья, за последние двадцать лет сырьевой сектор литиевой промышленности в России пришел в упадок [10–13]. Факторы трудной обогатимости российского сырья — сложный минеральный состав, низкое содержание лития и тонковкрапленность сподумена и ряда других минералов. За рубежом эксплуатируются более богатые руды простого минерального состава. Необходимо уменьшить зависимость промышленности России от импортного литиевого сырья [13, 14].

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН и поддержана РФФИ (проекты № 18-05-0 0434А и № 19-45-540003р\_а).

Крупные месторождения лития в России — “Завитинское” (Читинская область), “Тастыгское” (Республика Тыва) и “Колмозерское” (Мурманская область). Большинство месторождений расположено в труднодоступных для разработки районах. Единственная в России рудная база, использовавшаяся для производства литиевых концентратов до распада СССР, — Завитинское месторождение, разрабатывавшееся открытым способом Забайкальским ГОК [14].

В настоящее время Завитинское литиевое-бериллиевое месторождение выработано, рудник не эксплуатируется. В результате отработки в отвалах Забайкальского ГОК накоплены десятки миллионов тонн руды с содержанием оксида лития 0.25–0.30 %, которые могут решить проблему дефицита литиевого сырья. Результаты изучения основных характеристик и вещественного состава отвалов этого месторождения подтверждают перспективность дальнейших поисков современных технологий обогащения и переработки данного вида минерального сырья [15, 16].

Основной литийсодержащий минерал этого техногенного сырья — сподумен, способный в природных условиях подвергаться различным процессам выноса лития за счет превращения во вторичные фазы — слюду и глинистые минералы. На примере бедных сподуменовых руд Завитинского месторождения с содержанием 0.2 %  $\text{Li}_2\text{O}$  показано, что литий представлен сподуменом в сростках с другими минералами [16]. Нераскрытые минеральные ассоциации техногенных хвостов обогащения отличаются более высокой механической прочностью по сравнению с аналогичными ассоциациями в исходной руде. Вторичная переработка сырья сопряжена с разработкой новых подходов к раскрытию минеральных сростков с освобождением частиц сподумена. Основной метод обогащения отвалов Завитинского месторождения для выделения ценных компонентов — технология флотации [17–25]. Подготовка техногенного сырья к флотационному обогащению связана с повышением степени раскрытия сростков и снижением шламообразования, так как при флотации продукта с крупностью –0.02 мм разделение минералов протекает неэффективно.

Одна из главных причин недораскрытия минералов и/или переизмельчения техногенных отходов — неконтролируемые разрушающие воздействия, приводящие к потере ценных компонентов при рудоподготовке хвостов обогащения [26]. Переход к высокоэнергетическому измельчению — одно из прогрессивных направлений в раскрытии тонковкрапленных рудных объектов и минеральных сростков. Селективное раскрытие минеральных агрегатов техногенного литийсодержащего сырья, позволяющее обеспечить повышение качества концентратов, достигается в дезинтеграторах [16], характеризующихся высокоскоростным свободным ударом [27]. Цель настоящей работы — совершенствование технологии дозированного стадийного разрушения минеральных сростков с применением дезинтегратора [28].

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При изучении минерального состава и структурных преобразований минералов проб использовался рентгенофазовый анализ (прибор Дрон-4), химические анализы выполнялись на атомно-эмиссионном спектрометре JRIS (Thermo Elemental, США). Электромагнитная сепарация осуществлялась на приборе БСЭ-138 с напряженностью магнитного поля 1.27 Тл. Эффективность раскрытия минералов после обработки проб на лабораторной дезинтеграторной установке DESI-11 (Tootmise OÜ / Tallinn, Эстония) оценивалась по результатам флотационного обогащения. Извлечение сподумена происходило с помощью щелочной оттирки пульпы (50–70 % твердого):  $\text{NaOH}$  7 кг/т,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  1 кг/т в течение 30 мин при температуре 50–70 °С. В качестве флотореагента использовался олеат натрия ( $\text{NaOL}$ ) 500 г/т, вспенивателем служило сосновое масло 200 г/т. Для более полного извлечения сподумена из камерного продукта проводилась вторичная оттирка, аналогичная первой, и затем повторная флотация в тех же условиях.

Основной минеральный состав пробы техногенного сырья Забайкальского ГОК, согласно данным рентгенофазового анализа, представлен кварцем, плагиоклазом и калиевым полевым шпатом (рис. 1). Меньшее содержание дано для хлорита, мусковита, флюорита и анкерита. Количество целевого минерала сподумена  $\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$  в исходном сырье, по данным рентгенофазового анализа, составляет 1–2 % (рис. 1).

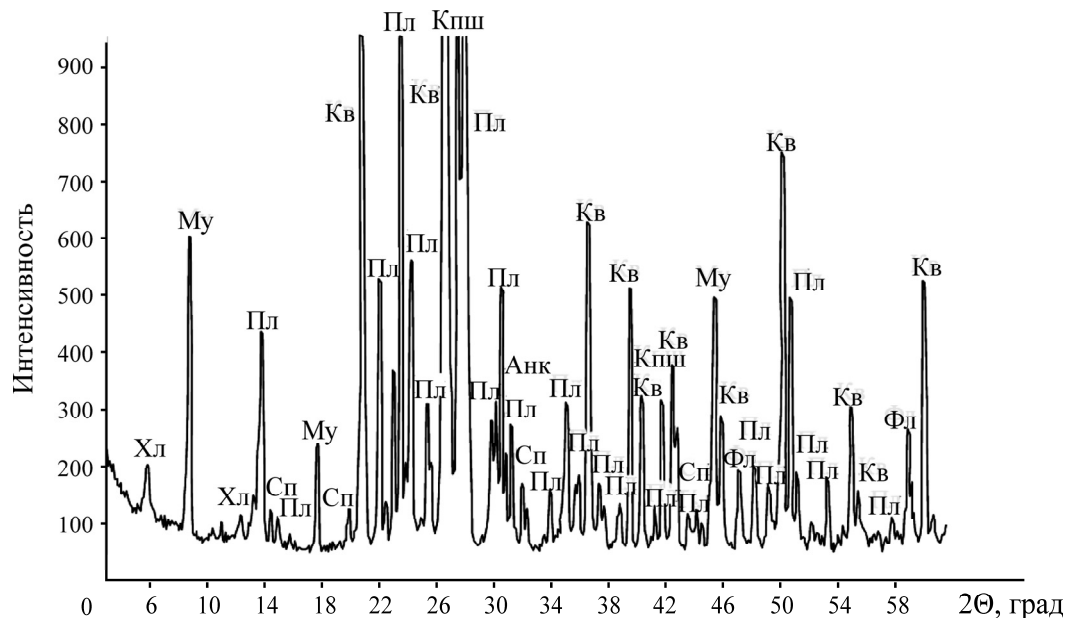


Рис. 1. Рентгенограмма исходной пробы: Кв — кварц; Пл — плагиоклаз; Кшш — калиевый полевой шпат; Сп — сподумен; Му — мусковит; Фл — флюорит; Хл — хлорит; Анк — анкерит

Химический состав представительной пробы приведен ниже (содержание  $\text{Li}_2\text{O}$  в пробе составляет 0.22 %):

$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{BaO}$	$\text{SO}_3$	$\text{Li}_2\text{O}$	П.п.п.	Сумма
78.75	0.05	12.83	0.52	0.03	<0.1	0.40	4.11	2.11	0.10	<0.01	<0.03	0.22	0.80	99.92

Примечание. П.п.п. — потери при прокаливании

Анализ гранулометрического состава исходной пробы показал, что содержание фракции  $-0.16$  мм составляет 31%, а извлечение  $\text{Li}_2\text{O}$  из фракции  $+0.16$  мм — 80 % (табл. 1), что обуславливает целесообразность доизмельчения исследуемого техногенного сырья.

ТАБЛИЦА 1. Гранулометрический состав исходной пробы техногенного сырья после предварительной рудоподготовки на щековой дробилке

Класс крупности, мм	Выход класса, %	Содержание $\text{Li}_2\text{O}$ , %	Извлечение $\text{Li}_2\text{O}$ , %
$-2+0.25$	33.4	0.32	46.14
$-0.25+0.16$	35.5	0.22	33.71
$-0.16+0.1$	15.6	0.15	10.10
$-0.1+0.02$	10.3	0.15	7.55
$-0.02$	4.2	0.10	2.70
Всего	100.0	0.23	100.00

В результате гравитационного разделения пробы с использованием бромформа ( $\text{CHBr}_3$ , плотность  $2.89 \text{ г/см}^3$ ) получен сподуменовый концентрат, в котором, по данным рентгенофазового анализа, отмечены также флюорит, мусковит, хлорит, амфибол и плагиоклаз (рис. 2).

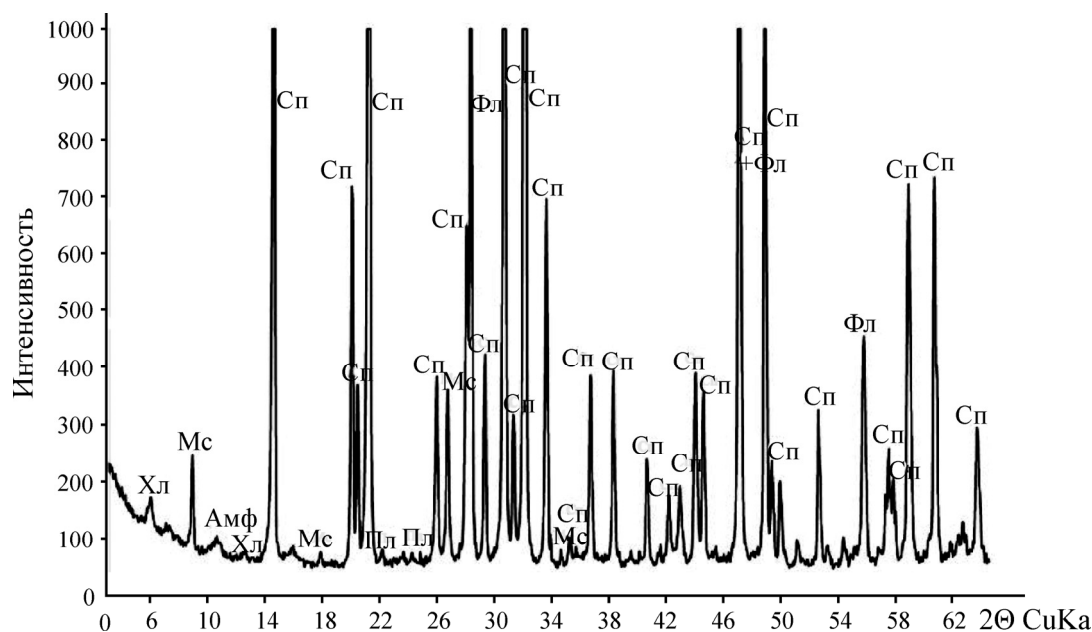


Рис. 2. Рентгенограмма тяжелой фракции исходного образца: Сп — сподумен; Фл — флюорит; Мс — мусковит; Хл — хлорит; Амф — амфибол; Пл — плагиоклаз

Гравитационное разделение пробы в тяжелых жидкостях позволяет прогнозировать разделимость минеральных компонентов (табл. 2). Из фракции +0.25 мм получен сподуменный концентрат с содержанием 5.07%  $Li_2O$ . Аналогичный показатель для фракций -0.25+0.16, -0.16+0.1 и -0.1 мм составил 4.21, 2.03 и 0.76% соответственно.

ТАБЛИЦА 2. Разделение в жидкости ( $CHBr_3$ ) продуктов россева исходной пробы

Класс крупности, мм	Тяжелая фракция	
	Выход фракции, %	Содержание $Li_2O$ , %
+0.25	7.20	5.07
-0.25+0.16	3.86	4.21
-0.16+0.1	4.96	2.03
-0.1	9.1	0.76

Для повышения селективности разрушения, сохранности структуры и снижения дефектообразования использовано ударное разрушение сросшихся минералов при ступенчатом возрастании частоты вращения дезинтегратора, начиная с наименее прочных зон срастания. Раскрытые минералы быстро выводились из пространства механических воздействий, а оставшаяся часть с более высокой прочностью межминеральных контактов подвергалась разрушению при увеличенных частотах вращения роторов DESI-11.

В экспериментах применен 6-циклового процесс дозированного дезинтеграторного измельчения, который позволил перевести основную массу сырья в продукт крупности -0.16 мм и на остаточное количество фракции +0.16 мм. Анализ гранулометрического состава диспергированных в стадийном режиме проб показал, что уже на первых стадиях измельчения увеличение числа оборотов ротора или скорости свободного удара повышает выход класса флотационной крупности -0.16+0.02 мм (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Результаты измельчения пробы техногенного литийсодержащего сырья в дезинтеграторе DESI-11 в условиях стадийного повышения энергии разрушения

Число стадий дозированного измельчения и классификации	Частота вращения роторов, об/мин					
	2400		3600		6000	
	Крупность (мм) и выход (%) фракций					
	- 0.16 + 0.02	- 0.02	- 0.16 + 0.02	- 0.02	- 0.16 + 0.02	- 0.02
1	36.9	2.4	55.5	3.8	65.4	13.6
2	16.8	1.0	18.3	5.4	13.7	2.2
3	12.1	0.7	6.0	0.7	4.3	0.8
4	7.6	0.4	3.32	0.4	—	—
5	5.1	0.2	2.0	0.24	—	—
6	2.8	0.1	1.6	0.1	—	—
Всего, %	81.3	4.8	86.7	10.64	83.4	16.6
	86.1		97.34		100.0	

Повышение энергии разрушения сrostков при измельчении сопровождается получением продукта флотационной крупности из образца за меньшее число циклов измельчения. При 2400 об/мин результат достигается за 6 стадии, а при 6000 об/мин — за 3. Наибольший выход продукта (70–80 %) необходимой степени дисперсности (- 0.16 + 0.02) происходит за первые 2–3 цикла.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрена основная технологическая операция при рудоподготовке техногенного сырья для совершенствования технологии тонкого измельчения за счет использования дозированного стадийного разрушения — циклического пропускания проб при заданной частоте обработки. Определяющий фактор ступенчатого и стадийного разрушения — регулирование подвода энергии. В качестве основного параметра селективного раскрытия минералов из сросшегося состояния при возрастающей энергии разрушения применялась относительная частота оппозитного вращения роторов 2400–6000 об/мин, позволяющая достичь наибольшей контрастности свойств разделяемых минералов в последующих процессах обогащения.

Первостепенная задача при исследовании процесса селективного раскрытия минеральных ассоциаций литийсодержащего техногенного сырья — разработка режимов механических воздействий, позволяющих минимизировать потери целевых продуктов, и способов оптимального использования имеющихся технических возможностей.

Из табл. 4 видно, что повышение энергии разрушения сrostков сопровождается получением продукта флотационной крупности за меньшее число циклов измельчения. При 2400 и 3400 об/мин проходит 6 стадий, а при 6000 об/мин 100 % получение фракции - 0.16 мм достигается за первые 3 стадии с выходом продукта необходимой степени дисперсности 67%. Несмотря на увеличение требуемого выхода при 2400 об/мин (76.5 %) и 3400 об/мин (76.1 %), остается доля фракций + 0.16 мм: 13.9 и 2.7 % соответственно. Особенность остаточных после классификаций фракций + 0.16 мм — содержание  $Li_2O$  0.74 % при 2400 об/мин и 1.01 % при 3600 об/мин, превышающее в несколько раз, по данным химического анализа, количество оксида лития в исходной пробе. Это связано с тем, что из-за различий в прочности сrostков и морфологических особенностей минералов, слагающих техногенное сырье, при недостаточном уровне энергетических нагрузок для раскрытия сросшихся минералов в процессе ударного разрушения при ступенчатой и/или стадийной обработке в дезинтеграторе происходит концентрация литийсодержащих минералов в менее дисперсных фракциях. Фракции + 0.16 мм представлены слюдами. Измеренное содержание  $Li_2O$  в электромагнитной фракции, состоящей из слюды, амфибола и кварц-полевошпатовой ассоциации, составляет 0.84 %.

Представительная фракция  $-0.02$  мм содержит  $0.10\%$  оксида лития, но это высокий показатель по сравнению с исходной пробой. При дозированном измельчении необходимо минимизировать образование частиц шламовых размеров. Из данных по содержанию этой фракции в продуктах, полученных при различных энергиях разрушения (табл. 4), следует, что наименьшим суммарным выходом ( $4.8\%$ ) характеризуется продукт, полученный обработкой при  $2400$  об/мин. Возрастание количества оборотов способствует ускорению процесса диспергирования и приводит к увеличению выхода частиц шламовой фракции в несколько раз до  $16.6\%$  при  $6000$  об/мин.

Данные гранулометрического состава диспергированных проб техногенного сырья и невозможность получения материала заданной крупности с приемлемым выходом при однократном прохождении пробы через систему пальцев дезинтегратора обусловили использование экспериментально созданной схемы стадийной и ступенчатой дезинтеграции, в которой класс, превышающий флотационную крупность, проходил обработку при более высоких оборотах роторов. Увеличение циклов измельчения в сочетании с классификацией и переходом к более высокоэнергетическим воздействиям при быстром выводе из процесса раскрытых минералов — эффективная процедура селективной подготовки техногенного сырья к обогащению.

Предложена установленная экспериментальным путем оптимальная схема дезинтеграции техногенного литийсодержащего продукта для раскрытия сростков минералов и получения продукта флотационной крупности  $-0.16+0.02$  мм при нулевом содержании фракции  $+0.16$  мм, которая включает следующие количества стадий измельчения и классификации с одним переходом на более высокую ступень: при  $2400$  об/мин — 3 и при  $3600$  об/мин — 2. Суммарный максимальный выход фракции  $-0.02$  мм составляет  $6.0\%$ .

Продукт подвергался флотационному обогащению по описанной методике. Выделился концентрат с содержанием  $Li_2O$   $1.2\%$  при выходе  $17\%$ . При флотации продуктов, полученных по условиям табл. 4 при  $3600$  об/мин (6 циклов) и  $6000$  об/мин (3 цикла), содержание  $Li_2O$  в пенных продуктах составляет  $0.55$  и  $0.40\%$  соответственно. Изменения качественно-количественных показателей флотации связаны с особенностями гранулометрического состава продуктов  $-0.16+0.02$ , полученных при ступенчатом повышении энергии ударных воздействий. По сравнению с предложенной схемой содержание фракции  $-0.05+0.02$  мм увеличивается с  $10$  до  $30\%$ , присутствуют более высокие содержания ( $10.64$  и  $16.6\%$ ) шламовых фракции  $-0.02$  мм.

Эффективность получения сподумена из пегматитового сырья флотационным методом зависит от степени раскрытия сподумена. При раскрытии сростков измельчением до крупности зерен  $-0.05$  мм поверхность минералов подвергается преобразованиям с частичной аморфизацией. В результате нивелируются поверхностные свойства минералов и снижается эффект флотационного разделения. Возникают задачи поиска новых селективно работающих реагентов с высокими собирательными свойствами.

В настоящее время идет поиск возможностей по модернизации реагентных режимов флотации и использования флотореагентов разного состава [19, 29–36], что применительно к техногенному сырью, подвергнутому измельчению по предложенной схеме для раскрытия минеральных сростков, создает перспективы дальнейшего повышения качества флотационного концентрата. Из анализа данных [20, 36] и нашего опыта работы по обогащению техногенного минерального сырья [26] можно дать следующие рекомендации:

— концентрирование (обогащение) сподумена. Методы обогащения сподумена — магнитная и гравитационная сепарация и флотация. Так как основные минералы сподумена — кварц и полевой шпат, то флотация — самый важный способ концентрирования сподумена;

— изменчивость свойств поверхности сподумена. Ионы  $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Mg^{2+}$  и  $Pb^{2+}$  могут эффективно улучшать и усиливать поведение сподумена при флотации, когда в качестве собирателя используется NaOL или NaOL/DDA (додециламин,  $C_{12}H_{25}NH_2$ ). Гидроксо-комплексы этих ионов играют важную роль в адсорбции коллектора. Большинство новых сообщенных коллекторов сподумена смешанные. Количество исследований сподуменовых коллекторов ограничено [36];

— селективность измельчения сподуменосодержащего сырья. Способ измельчения и среда могут влиять на поверхностный заряд, процент открытой поверхности и активные участки сподумена. Следует выбрать мокрый помол при применении различных мельниц и материала мельющих тел и сократить время измельчения (особенно при использовании планетарных мельниц [26]). Таким требованиям отвечает дезинтегратор. По результатам [20] и наших исследований на рис. 3 предлагается схема переработки техногенного сподуменосодержащего сырья.

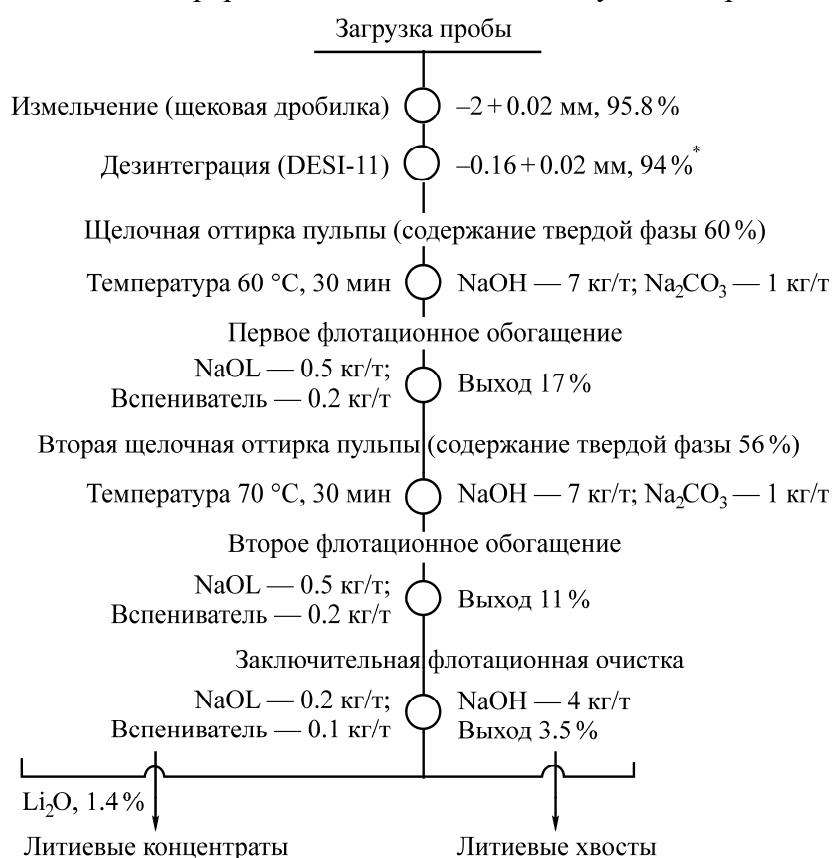


Рис. 3. Проведенные экспериментальные исследования по дезинтеграторному вскрытию и обогащению литий содержащего техногенного сырья Завитинского ГОК; \* — предлагаемый комбинированный способ дезинтеграции: 2400 об/мин (3 цикла); 3600 об/мин (2 цикла)

Исследователи считают, что будущее производство лития и его соединений из обедненного литием сырья должно быть направлено на продвижение изучения и совершенствования флотации сподумена. Поверхностное растворение раствором NaOH может улучшать флотацию сподумена, а растворами HCl или  $Na_2CO_3$  — подавлять вспенивание сподумена. Предварительная обработка NaOH может рассматриваться для прямой флотации, а обработка HCl или  $Na_2CO_3$  — для обратной.

Собирающая способность и селективность отдельных коллекторов уступает смешанным, которые представлены смесью катионного и анионного коллектора. Структуры, содержащие амфотерные группы, могут быть эффективными собирателями сподумена. Полярные группы –CONHOH и –OSO<sub>3</sub>H, схожие с Al-центрами на поверхности сподумена, перспективны для использования в будущем.

### ВЫВОДЫ

Исследован процесс селективного раскрытия минеральных ассоциаций литийсодержащего техногенного сырья на основе использования дозированного стадийного и ступенчатого ударного разрушения в дезинтеграторе DESI-11. Показано, что определяющий фактор стадийного и ступенчатого измельчения высокоэнергетическим свободным ударом в дезинтеграторе — возможность регулирования подвода механической энергии варьированием числа обработок пробы и относительной частотой оппозитного вращения роторов DESI-11 в интервале 2400–6000 об/мин.

Число циклов измельчения, необходимых для перевода основной массы сырья в продукт флотационной крупности  $-0.16+0.02$  мм, зависит от энергии разрушения сростков. При частоте вращения 2400 и 3600 об/мин результат достигается за 6 стадий, а при частоте 6000 об/мин — за 3.

Предложена оптимальная комбинированная схема дезинтеграции проб техногенного литийсодержащего сырья для раскрытия сростков минералов и получения продукта флотационной крупности  $(-0.16+0.02)$  мм с минимальным выходом (6.0%) шламовой фракции  $(-0.02)$  мм. Сравнительная эффективность процесса рудоподготовки в различных режимах измельчения проб в дезинтеграторе оценивалась по результатам их флотационного обогащения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Калинин Е. П.** Обзор минерально-сырьевого потенциала редкометалльного сырья Российской Федерации // Изв. КомиНЦ УрО РАН. — 2017. — № 3 (31). — С. 107–109.
2. **Рыжова Л. П., Салей А. У.** Проблемы и перспективы развития минерально-сырьевой базы рудных месторождений в России и за рубежом // Вестн. науки и образования. — 2018. — Т. 1. — № 5(41). — С. 46–49.
3. **Rzelewska-Piekut M. and Regel-Rosocka M.** Wastes generated by automotive industry — Spent automotive catalysts, *Physical Sci. Rev.*, 2018, Vol. 3, Iss. 8. — 27 p. DOI: <https://doi.org/10.1515/psr-2018-0021>
4. **Qi T., Wang W., Wei G., Zhu Z., Qu J., Wang L., and Zhang H.** Technical progress of green high-value utilization of strategic rare metal resources, *Guocheng Gongcheng Xuebao, The Chinese J. Proc. Eng.*, 2019, Vol. 19 (1 June). — P. 10–24. DOI: [10.12034/j.issn.1009-606X.219142](https://doi.org/10.12034/j.issn.1009-606X.219142)
5. **Perez J. P. H., Folens K., Leus K., Vanhaecke F., Van Der Voort P., and Laing G. D.** Progress in hydrometallurgical technologies to recover critical raw materials and precious metals from low-concentrated streams, *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, Vol. 142 (March). — P. 177–188. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.029>
6. **Spooren J., Binnemans K., Björkmalm J., Breemers K., Dams Y., Folens K., González-Moya M., Horckmans L., Komnitsas K., Kurylak W., Lopez M., Mäkinen J., Onisei S., Oorts K., Peys A., Pietek G., Pontikes Y., Snellings R., Tripiana M., Varia J., Willquist K., Yurramendi L., and Kinnunen P.** Near-zero-waste processing of low-grade, complex primary ores and secondary raw materials in Europe: Technology development trends (Review), *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, Vol. 160 (September). — 18 p. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104919>



7. **Малютин Ю. С.** Техногенные минерально-сырьевые ресурсы цветной металлургии России и перспективы их использования // Маркшейдерия и недропользование. — 2001. — № 1. — С. 21–25.
8. **Ежов А. И.** Оценка техногенного сырья в Российской Федерации (твердые полезные ископаемые) // Горные науки и технологии. — 2016. — № 4. — С. 62–72.
9. **Tadesse B., Makuei M., Albijanic B., and Dyer L.** The beneficiation of lithium minerals from hard rock ores: A review, *Min. Eng.*, 2019, Vol. 131 (15 January). — P. 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.023>
10. **Dessemond C., Lajoie-Leroux F., Soucy G., Laroche N., and Magnan J.-F.** Spodumene: The lithium market, resources and processes (Review), *Minerals*, 2019, Vol. 9 (29 May). — 17 p. DOI: 10.3390/min9060334
11. **Salakjani N. Kh., Singh P., and Nikoloski A. N.** Production of lithium — A literature review. Part 1: Pretreatment of spodumene, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2019, Taylor & Francis Group (29 May). — 14 p. <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1643343>
12. **Salakjani N. Kh., Singh P., and Nikoloski A. N.** Production of lithium — A literature review. Part 2. Extraction from spodumene, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2019, Taylor & Francis Group (18 Dec). — 16 p. <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1700984>
13. **Владимиров А. Г., Ляхов Н. З., Загорский В. Е., Макагон В. М., Кузнецова Л. Г., Смирнов С. З., Исупов В. П., Белозеров И. М., Уваров А. Н., Гусев Г. С., Юсупов Т. С., Анникова И. Ю., Бескин С. М., Шокальский С. П., Михеев Е. И., Котлер П. Д., Мороз Е. Н., Гаврюшкина О. А.** Литиевые месторождения сподуменовых пегматитов Сибири // Химия в интересах устойчивого развития. — 2012. — Т. 20. — № 1. — С. 3–20. <https://www.sibran.ru/upload/iblock/4d4/4d4c84b229fa1af2578e7e039482efed.pdf>
14. **Азарова Ю. В., Казанцев В. В., Кольцов В. Ю., Сарычев Г. А., Тананаев И. Г.** Отвалы Завитинского литиево-бериллиевого месторождения как сырье для получения лития // Обогащение руд. — 2015. — № 2. — С. 42–46.
15. **Kol'tsov V. Y., Yudina T. B., Azarova Y. V., Semenov A. A., Lizunov A. V., and Lesina I. G.** Comparative geological and mineral-petrological analysis of ore-bearing rock in lithium and beryllium deposits for modeling the behavior of ore minerals during processing, *Atomic Energy*, 2017, Vol. 122, Iss. 2. — P. 81–86. DOI: 10.1007/s10512-017-0239-7
16. **Юсупов Т. С., Бакшеева И. И., Ростовцев В. И.** Исследование влияния различных видов механических воздействий на селективность разрушения минеральных ассоциаций // ФТПРПИ. — 2015. — № 6. — С. 182–188.
17. **Samková R.** Recovering lithium mica from the waste after mining SN-W ores through the use of flotation, *GeoScience Engineering*, 2009, Vol. LV, No. 1. — P. 33–37. DOI: 10.1.1.390.8776
18. **Bulatovic S. M.** Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice, 1<sup>st</sup> Ed., Vol. 3: Flotation of Industrial Minerals, Amsterdam, et al.: Elsevier, 2014. — 238 p.
19. **Егоров А. М., Лаврентьев А. В., Сарычев Г. А., Тананаев И. Г.** Технология флотационного обогащения концентратов при переработке отвалов Завитинского литиево-бериллиевого месторождения // Цв. металлы. — 2016. — № 5(881). — С. 23–26. <http://dx.doi.org/10.17580/tsm.2016.05.03>
20. **Tian J., Xu L., Wu H., Fang S., Deng W., Peng T., Sun W., and Hu Y.** A novel approach for flotation recovery of spodumene, mica and feldspar from a lithium pegmatite ore, *J. Cleaner Production*, 2018, Vol. 174 (10 February). — P. 625–633. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.331>
21. **Fuerstenau D. W. and Pradip.** A century of research leading to understanding the scientific basis of selective mineral flotation and design of flotation collectors (REVIEW ARTICLE), *Mining, Metallurgy and Exploration*, 2019 (15 January). — P. 1–18. <https://doi.org/10.1007/s42461-018-0042-6>

22. **Li H., Eksteen J., and Kuang G.** Recovery of lithium from mineral resources: State-of-the-art and perspectives — A review, *Hydrometallurgy*, 2019, Vol. 189 (November). — 17 p. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105129>
23. **Karrech A., Azadi M. R., Elchalakani M., Shahin M. A., and Seibi A. C.** A review on methods for liberating lithium from pegmatites, *Min. Eng.*, 2020, Vol. 145 (1 January). — 10 p. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106085>
24. **Tanhua A., Sinche-Gonzalez M., Kalapudas R., Tanskanen P., and Lamberg P.** Effect of waste rock dilution on spodumene flotation, *Min. Eng.*, 2020, Vol. 150 (1 May). — 9 p. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106282>
25. **Zhou H.-P., Hu J., Zhang Y.-B., Cao Y.-J., Luo X.-P., and Tang X.-K.** Effectively enhancing recovery of fine spodumene via aggregation flotation, *Rare Metals*, 2020, Vol. 39, No. 3. — P. 316–326. <https://doi.org/10.1007/s12598-019-01365-5>
26. **Юсупов Т. С., Шумская Л. Г., Кондратьев С. А., Кириллова Е. А., Уракаев Ф. Х.** Использование механоактивационного измельчения в процессах обогащения техногенного оловосодержащего сырья // ФТПРПИ. — 2019. — № 5. — С. 121–127. DOI: 10.15372/FTPRPI20190513
27. **Уракаев Ф. Х., Юсупов Т. С.** Численная оценка кинематических и динамических характеристик обработки минералов в дезинтеграторе // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 135–142.
28. **Laptev Yu. V., Shevchenko V. S., and Urakaev F. Kh.** Sulphidation of valleriite in SO<sub>2</sub> solutions, *Hydrometallurgy*, 2009, Vol. 98, Iss. 3–4. — P. 201–205. DOI: 10.1016/j.hydromet.2009.06.002
29. **Курков А. В., Котова В. М.** Современное состояние и основные направления развития процессов глубокой и комплексной переработки редкометального сырья // Горн. журн. — 2007. — № 2. — С. 72–77.
30. **Hu Z. and Sun C.** Effects and mechanism of different grinding media on the flotation behaviors of beryl and spodumene, *Minerals*, 2019, Vol. 9, No. 11. — 12 p. DOI: 10.3390/min9110666
31. **Wang Y., Zhu G., Yu F., Lu D., Wang L., Zhao Y., and Zheng H.** Improving spodumene flotation using a mixed cationic and anionic collector, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2018, Vol. 54, No. 2. — P 567–577. <http://dx.doi.org/10.5277/ppmp1861>
32. **Tian M., Gao Z., Khoso S.A., Sun W., and Hu Y.** Understanding the activation mechanism of Pb<sup>2+</sup> ion in benzohydroxamic acid flotation of spodumene: Experimental findings and DFT simulations, *Min. Eng.*, 2019, Vol. 143b (Nov). — 10 p. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106006>
33. **Xie R., Zhu Y., Liu J., Wang X., and Li Y.** Differential collecting performance of a new complex of decyloxy-propylamine and  $\alpha$ -bromododecanoic acid on flotation of spodumene and feldspar, *Min. Eng.*, 2020, Vol. 153 (1 July). — 9 p. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106377>
34. **Xu L., Jiao F., Jia W., Pan Z., Hu C., and Qin W.** Selective flotation separation of spodumene from feldspar using mixed anionic/nonionic collector, *Colloids and Surfaces A*, 2020, Vol. 594 (5 June). — 7 p. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124605>
35. **Zhu G., Zhao Y., Zheng X., Wang Y., Zheng H., and Lu D.** Surface features and flotation behaviors of spodumene as influenced by acid and alkali treatments, *Appl. Surf. Sci.*, 2020, Vol. 507 (30 March). — 13 p. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.145058>
36. **Xie R., Zhu Y., Liu J., Li Y., Wang X., and Shumin Z.** Research status of spodumene flotation: A review, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2020, Taylor & Francis Group (10 Jun). — 14 p. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1776278>

*Поступила в редакцию 12/VIII 2020*

*После доработки 14/VIII 2020*

*Принята к публикации 11/IX 2020*