

УДК 622.7.017

**ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ СПОДУМЕНСОДЕРЖАЩИХ ПЕГМАТИТОВ
НА МИНЕРАЛЬНЫЕ ФРАКЦИИ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЛИТИЯ**

**А. С. Юдин¹, К. Л. Новоселов¹, С. Ю. Дацкевич¹,
М. Ю. Журков¹, Н. Т. Ворогушин²**

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
E-mail: zhurkov@tpu.ru, просп. Ленина, 2а, 634050, г. Томск, Россия

²ПАО Химико-металлургический завод, E-mail: vorogushin@gmail.com,
ул. Александра Матросова, 30, стр. 49, 660079, г. Красноярск, Россия

Выполнены исследования электроимпульсной дезинтеграции сподуменсодержащих пегматитов. Установлено, что обработка импульсными электрическими разрядами обеспечивает частичное раскрытие мономинеральной части сподумена, при этом наилучшее выделение кристаллов сподумена в сростаниях и без таковых происходит при измельчении исходной породы до крупности от 1 до 4 мм. Сами кристаллы сподумена практически не разрушаются, как при механической обработке, и представляют собой цельные фрагменты. Последующее гравитационное разделение позволит получить сподуменовый концентрат для дальнейшего извлечения лития.

Сподумен, литий, руда, пегматиты, сростания, дезинтеграция, разрушение, минералы, электроимпульсный способ, дробление

DOI: 10.15372/FTPRPI20240620
EDN: KQJKGX

Значение лития в современной экономике трудно переоценить. Он является одним из основных компонентов современных аккумуляторных батарей, рынок которых составляет 56 % мирового потребления лития и неуклонно растет [1]. Литий применяется в ядерной энергетике, военной технике, при изготовлении керамики, специального стекла, смазок, полимеров и других материалов [2]. Рынок лития в России формирует ~3 % мирового спроса на этот металл.

В России отсутствует добыча литиевого сырья, часть импортируется в виде металла, часть производится из импортного сырья, поступающего из Чили, Аргентины и Китая. Российские ресурсы запасов лития по разным оценкам составляют 1.0–4.2 млн т. По разведанным запасам лития Россия находится на пятом месте в мире [3]. Основное литиевое сырье в России — сподуменные пегматиты, затраты на переработку которых оказываются выше, чем активно используемое с недавнего времени литиеносное гидроминеральное сырье [4, 5]. Поэтому многие российские производства оказались нерентабельными и были остановлены либо перестроены с учетом новых сырьевых источников [6].

Возможным решением задачи расширения отечественной базы литиевого сырья может стать разработка руд забалансовых отвалов ряда горных предприятий России. Одно из таких предприятий — Забайкальский ГОК, перерабатывавший во времена СССР руду Завитинского месторождения [7]. За 30 лет его работы образовалось почти 20 млн т техногенного сырья со средним содержанием сподумена ~10 %. Результаты исследований показывают принципиальную возможность обогащения данного сырья с получением концентратов для дальнейшей переработки [8].

Основанная на “эффекте Воробьевых” [9] электроимпульсная дезинтеграция материалов — одно из возможных перспективных направлений развития горно-перерабатывающей промышленности [10]. При современном уровне развития электроимпульсного способа его промышленное применение сдерживается сложностью технологического оборудования и относительно невысокой производительностью [11, 12]. Достигнутые к настоящему времени значения производительности коммерческих установок электроимпульсной дезинтеграции составляют до 8000 т/год [13], что намного ниже требуемых значений. Некоторыми исследователями отмечается низкая энергетическая эффективность процесса, особенно при дроблении мелких фракций горных пород [12, 14], что связано с используемыми в установках схемами генерирования импульсного напряжения, в которых основные потери энергии (до 90 %) приходится на потери в разрядном контуре и только ~10 % энергии расходуется на полезную работу [15]. При использовании более совершенных схем генерирования импульсных напряжений это соотношение возможно изменить, увеличив общую энергетическую эффективность способа. Доказано, что электроимпульсная дезинтеграция обладает существенными преимуществами перед механическими способами измельчения материалов (эффективное раскрытие мономинералов из полиминеральных руд, высокая чистота продуктов, отсутствие загрязнения посторонними примесями). В [12, 16] отмечается, что электроимпульсное разрушение может быть весьма эффективным при дезинтеграции руд с раскрытием минералов крупного размера без их переизмельчения, в том числе для последующей их переработки традиционными способами. Установлено, что при электроимпульсной дезинтеграции для каждой руды имеется оптимальное значение энерговклада, которому соответствует минимум энергии, необходимой для получения единицы массы высвобождаемых целевых минералов [17, 18].

В настоящей работе с применением электроимпульсного способа проведена дезинтеграция сподуменовых пегматитов Завитинского месторождения Забайкальского края с целью оценки возможности использования данного способа для раскрытия целевого минерала — сподумена, а также определены энергетические характеристики данного процесса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Электроимпульсная дезинтеграция руд проводилась на сконструированном лабораторном стенде в заполненной водопроводной водой разрядной камере с электродной системой “острие–плоскость” (рис. 1). Источником высоковольтных импульсов служил генератор Маркса с двухсторонней зарядкой и емкостью в ударе 25 нФ, обеспечивающий амплитуду напряжения до 500 кВ с длительностью фронта импульса ~200 нс. Для контроля работы установки и оценки эффективности электроимпульсного процесса непрерывно регистрировался ток и напряжения с помощью пояса Роговского и низкоиндуктивного делителя импульсных напряжений с использованием цифрового запоминающего осциллографа Tektronix TDS2024.

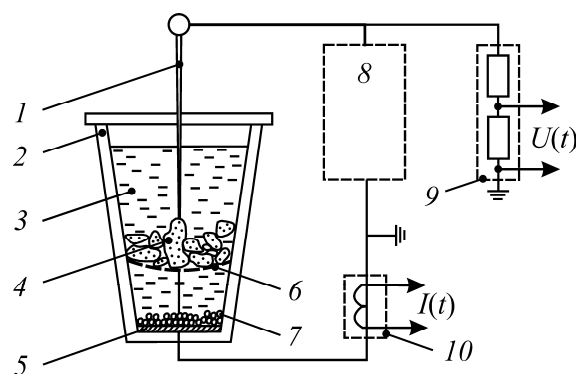


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для электроимпульсного дробления сподуменовой породы: 1 — высоковольтный электрод; 2 — диэлектрическая разрядная камера; 3 — вода; 4 — обрабатываемая руда; 5 — заземленный электрод-дно; 6 — съемный заземленный электрод-сито; 7 — измельченная руда; 8 — генератор высоковольтных импульсов; 9 — высоковольтный импульсный делитель напряжения; 10 — пояс Роговского

Исходный размер штучных образцов пегматитов с включениями сподумена достигал 235 мм, что определяло начальное расстояние между электродами. При таком межэлектродном расстоянии для разрушения требуется высокое начальное напряжение и соответствующий запас энергии в генераторе. По мере измельчения и уменьшения размеров обломков породы межэлектродное расстояние и напряжение должны пропорционально снижаться для исключения переизмельчения материала и уменьшения непроизводительных затрат энергии. Оперативно подстраивать указанные параметры в эксперименте достаточно сложно, поэтому электроимпульсная дезинтеграция руды осуществлялась в два этапа. На первом этапе крупные фрагменты сподуменовой породы измельчались до $-70+0$ мм. Для этого в разрядную камеру на заземленный электрод-дно без установленного электрода-сита загружалось в зависимости от размеров от одного до трех кусков породы. Расстояние между высоковольтным и заземленным электродами составляло 110 мм, в отдельных случаях высоковольтный электрод устанавливался на поверхность наиболее крупного штуча руды, тогда межэлектродный промежуток определялся толщиной данного обломка, но не превышал 235 мм. После подачи нескольких импульсов образец под электродом раскалывался на меньшие обломки и расстояние возвращалось к заданному. Дальнейшее количество подаваемых импульсов обуславливалось достижением всеми фрагментами размеров менее ~ 70 мм, после чего подача импульсов прекращалась и измельченная порода вынималась. Амплитуда импульсов напряжения на высоковольтном электроде с учетом снижения вследствие высокой проводимости воды составляла до 440 кВ. На рис. 2 представлена осциллограмма тока и напряжения при электроимпульсном дроблении сподуменовой руды.

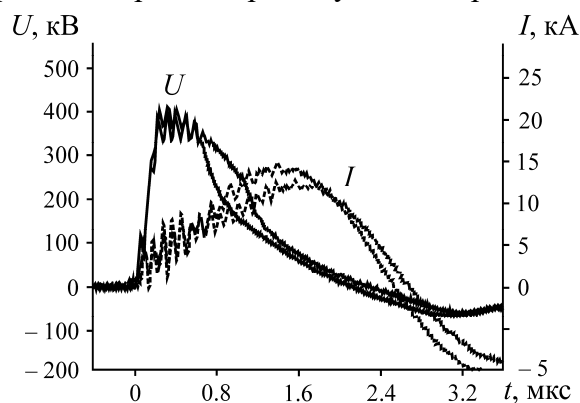


Рис. 2. Осциллограммы тока I и напряжения U при пробое фракции сподуменовой руды в воде

На втором этапе обработки полученная фракция сподуменового пегматита электроимпульсным способом измельчалась до более мелких фракций. В камеру устанавливался заземленный электрод-сито с диаметром отверстий 10 или 14 мм (рис. 3). Через них во время обработки измельченная порода могла покидать разрядную зону и накапливаться в пространстве под электродом-ситом объемом 3.5 л. Таким образом порциями по 1–2 кг в разрядную камеру загружалось до 6 кг исходной руды. Расстояние между электродами составляло 60 мм, амплитуда пробивного напряжения — до 400 кВ.

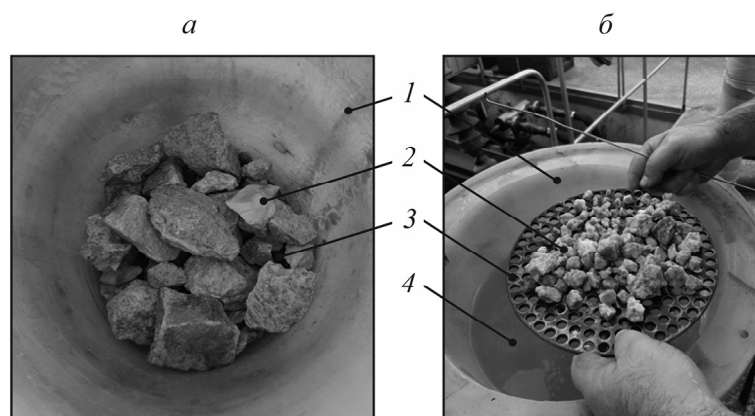


Рис. 3. Электроимпульсное дробление сподуменовой породы на втором этапе до (а) и после (б) подачи импульсов: 1 — разрядная камера, 2 — сподуменовая руда; 3 — электрод-сито; 4 — вода

В экспериментах на каждом этапе оценивалось количество энергии, затраченной на обработку руды, исходя из количества поданных импульсов и энергии в разряде генератора. В зависимости от условий эксперимента запасаемая генератором энергия варьировала, составляя на первом этапе 3.1–4.2, на втором — 3.9–6.2 кДж.

После электроимпульсного измельчения на втором этапе руда с помощью сит рассеивалась на фракции – 1 + 0, – 4 + 1, – 10 + 4, – 14 + 10 мм. Из фракций – 4 + 1 и – 10 + 4 мм методом квартования отбирались навески для последующего минералогического анализа, из которых изучалось по 300 случайным образом выбранных зерен каждой фракции. Минералогическое исследование проводилось на стереомикроскопе тринокулярного типа Carton DSZT44 (TRIO 1044). Дальнейшее изучение обломочного материала для фракции с лучшим раскрытием сподумена осуществлялось разделением обломков в тяжелой жидкости. С учетом планируемой гравитационной сепарации сподумена использовался бромформ (плотность 2.88–2.89 г/см³).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ фракций измельченной электроимпульсным способом руды показал, что минеральный состав зерен обломочной фракции – 10 + 4 мм на 31 % представлен раскрытыми зернами (без взаимных срастаний) породообразующих минералов и рудного сподумена. Фракция – 4 + 1 мм на 59 % состоит из раскрытых зерен. Распределение минералов в каждой фракции приведено в таблице. Наибольшее раскрытие зерен породообразующих минералов наблюдается в более тонкой фракции – 4 + 1 мм. При сравнении минералогического состава обломочных зерен с общим количественно-минералогическим составом породы выявлено, что преобладающая доля альбита и кварца породы представлена в данной фракции мономинеральными обломками. Об этом свидетельствует и состав сростков, где преимущественно участвуют микроклины и мусковит, в меньшей степени — альбит и кварц.

Количественное соотношение минералов в разных фракциях после электроимпульсной обработки, %

Минерал		Класс крупности, мм	
		–4+1	–10+4
Срастания	Без сподумена	33	62
	Со сподуменом	8	7
	Всего	41	69
Раскрытые зерна	Альбит	23	17
	Кварц	25	9
	Микроклин	7	2
	Мусковит	2	2
	Сподумен	2	1
	Всего	59	31

Сподумен, составляющий 10.1 % породы, представлен соответствующей количественной долей и в обломочном материале обеих исследованных фракций, т. е. 2 % мономинеральных зерен и 8 % в срастаниях для фракции –4+1 мм и 1 и 7 % соответственно для крупнообломочной фракции. Плохая раскрываемость сподумена, вероятнее всего, обусловлена отдельностью, характерной для его кристаллов. Кристаллы сподумена обладают досковидно-уплощенным обликом (рис. 4а), плоскости отдельности параллельны грани пинакоида (100). Именно по этим направлениям минерал наиболее подвержен разрушению (рис. 4б), что обычно наблюдается в природных условиях. Тем не менее это позволяет раскрывать зерна сподумена без переизмельчения, что подтверждается данными исследования полученной обломочной фракции.

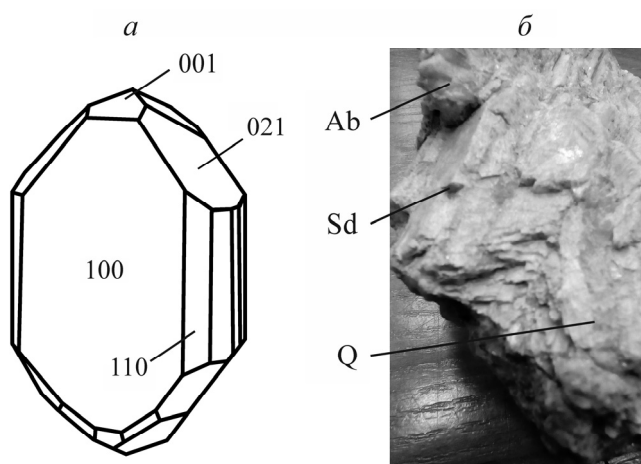


Рис. 4. Облик кристалла сподумена (а) и штуф породы: Sd — кристаллы сподумена (светлые, чуть розоватые с четко выраженной отдельностью в центре); Ab — голубоватый альбит; Q — кварц

В исследованной обломочной фракции сподумен всегда представлен пластинками, наиболее соответствующими фрагментам отдельности (рис. 5а), везде сохранены уплощенно-призматические формы зерен, т. е. разрушение происходит только по ослабленным направлениям. Отметим, что при механическом дроблении такие удлиненные досковидные формы обычно разрушаются. В обломочной фракции сподумен образует преимущественно срастания с микроклином и кварцем (рис. 5б), последние содержат включения тонких чешуек мусковита. При электроимпульсном дроблении мусковит также раскалывается на тонкие листочки за счет

весьма совершенной спайности. В результате сподумен и мусковит составляют небольшую объемную долю в сростаниях и представлены фрагментами, оставшимися после разделения их по плоскостям отдельности и направлениям спайности соответственно.

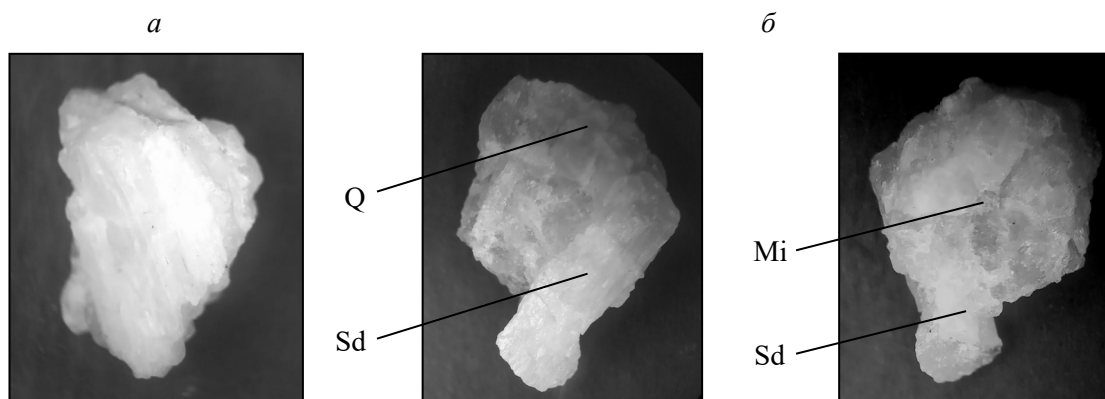


Рис. 5. Обломки кристаллов сподумена (а) и удлиненно-досковидный кристалл сподумена (б) в сростании с кварцем Q и микроклином Mi

Для разделения в тяжелой жидкости из общего количества 300 зерен фракции размером $-4+1$ мм отбиралось 30 зерен, содержащих сподумен, часть из которых не образуют сростаний, остальные — в сростаниях с кварцем или микроклином. Все шесть обломков сподумена (удельный вес 3.1–3.2, рис. 6а), а также 11 сростков отделились в бромформе (рис. 6б), оставшиеся 13 зерен-сростков показали плотность менее 2.89 г/см^3 . Основным критерий, определяющий попадание таких сростков в число промышленно ценных с возможностью дальнейшей добычи лития из них, — размер зерна. На рис. 6б представлены сростки сподумена и кварца размером не более 3.5 мм, проходящие предел плотности для дальнейшей переработки.

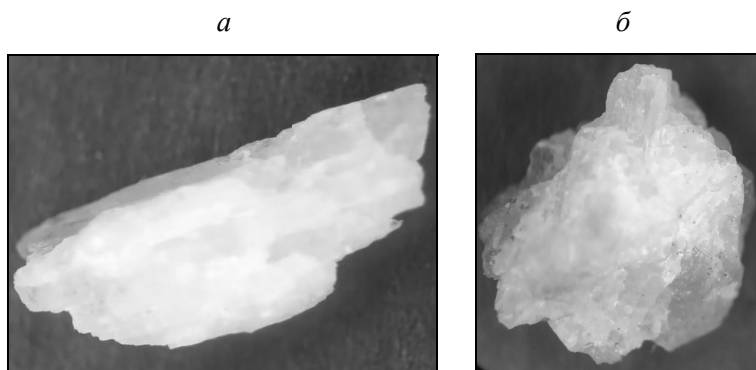


Рис. 6. Обломки кристаллов сподумена (а) и сростаний сподумена с породообразующими минералами (б) плотностью более 2.89 г/см^3

Сподумен в сростаниях с другими минералами образует включения примерно одного и того же размера 1.5–3.5 мм по удлинению кристалла. Он раскалывается по направлениям отдельности, и в сростаниях остается тонкая часть таблитчатого кристалла, граничащего с породообразующим кварцем или микроклином. С увеличением размера сростка увеличивается лишь доля породообразующего минерала при неизменном размере фрагмента сподумена: чем крупнее сростание, тем меньше на плотность зерна влияет сподумен, и большее влияние оказывают другие минералы, в частности кварц (удельный вес 2.65) и микроклин (2.54–2.57). Сростки размером 3.5–4.0 мм и выше (рис. 7) имеют плотность менее 2.89 г/см^3 и при разде-

лении в бромоформе не попадают в число зерен со сподуменом для дальнейшего извлечения лития. Для максимально полного извлечения сподумена целесообразно дробить исходную руду до крупности 3.5 мм. Измельчение до крупности < 1 мм нецелесообразно вследствие переизмельчения обломков сподумена и существенного увеличения энергозатрат на обработку.

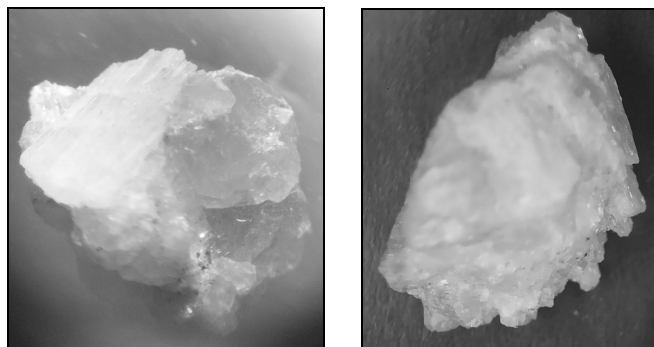


Рис. 7. Сподумен в сростаниях с кварцем, зерна плотностью менее 2.89 г/мм^3

Общий вес сподуменовой породы, обработанной электрическими импульсными разрядами, составил 300 кг. Удельные затраты энергии на электроимпульсную обработку исходной руды, рассчитанные из запасаемой генератором энергии и количества поданных импульсов, в разных экспериментах значительно различались. При получении мелких фракций на втором этапе энергозатраты максимальны и составляли 21.37–78.68 кВт·ч/т, при этом на первом этапе при дроблении крупных обломков сподуменовой руды до фракций средних размеров энергозатраты существенно ниже (от 0.89 до 4.04 кВт·ч/т). Такой высокий в сравнении с традиционными механическими способами дробления уровень энергозатрат как на первом, так и на втором этапе, а также большой разброс полученных значений обусловлен существенным различием исходных размеров штучков, выбранных для каждого эксперимента.

ВЫВОДЫ

Установлено, что электроимпульсная обработка сподуменосодержащих пегматитов Завитинского месторождения обеспечивает частичное раскрытие мономинеральной части сподумена. Последующее гравитационное разделение полученного электроимпульсным способом обломочного материала позволяет получить сподуменный концентрат для дальнейшего извлечения лития. Наилучшее выделение кристаллов сподумена в сростаниях и без таковых происходит при измельчении исходной породы электрическими разрядами до крупности 1–4 мм, а с учетом дальнейшего гравитационного разделения наиболее полное извлечение сподумена достигается для зерен размерами менее 3.5 мм. Кристаллы сподумена практически не разрушаются, как при механической обработке, и представляют собой цельные обломки. Максимальные удельные затраты энергии при электроимпульсной обработке руды в лабораторных условиях для среднего и мелкого дробления составили 4.04 и 78.7 кВт·ч/т соответственно, что превышает типичные энергозатраты для механических способов дробления и свидетельствует о недостаточной энергоэффективности используемой для измельчения экспериментальной установки. При оптимизации параметров процесса электроимпульсной обработки возможно увеличение доли выхода чистого сподумена или его доли с низким содержанием примесей. Адаптируя методику обработки под исходные физические параметры фракций руды, можно существенно скорректировать уровни затрат энергии с целью достижения низких значений удельных энергозатрат, характерных для электроимпульсного разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А. А. Макарова, Т. А. Митровой, В. А. Кулагина. — М.: ИНЭИ РАН, 2019. — 210 с.
2. Боярко Г. Ю., Хатьков В. Ю., Ткачева Е. В. Сырьевой потенциал лития России // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. — 2022. — Т. 333. — № 12. — С. 7–16.
3. Tsivadze A. Y., Bezdomnikov A. A., and Kostikova G. V. The lithium boom: lithium sources and prospects for the Russian lithium industry, *Geol. Ore Deposits*, 2023, Vol. 65, No. 5. — P. 463–468.
4. Рябцев А. Д. Переработка литиеносного поликомпонентного гидроминерального сырья на основе его обогащения по литию: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. — Томск, 2011. — 42 с.
5. Рябцев А. Д. Гидроминеральное сырье — неисчерпаемый источник лития в XXI веке // Изв. ТПУ. — 2004. — Т. 307. — № 7. — С. 64–70.
6. Владимиров А. Г., Ляхов Н. З., Загорский В. Е. Литиевые месторождения сподуменовых пегматитов Сибири // Химия в интересах устойчивого развития. — 2012. — Т. 20. — № 1. — С. 3–20.
7. Наумов Д. В., Курков А. В., Ануфриева С. И., Чепрасов И. В., Ворогушин Н. Т. Оценка комплекса физических методов обогащения бедных отвалов переработки сподуменосодержащих руд // Тр. КНЦ РАН. Серия: Техн. науки. — 2023. — Т. 14. — № 1. — С. 188–191.
8. Юсупов Т. С., Исупов В. П., Владимиров А. Г., Загорский В. Е., Кириллова Е. А., Шумская Л. Г., Шацкая С. С., Ляхов Н. З. Исследование вещественного состава и разделимости минералов техногенного сырья с целью оценки возможности получения литиевых концентратов // ФТПРПИ. — 2014. — № 6. — С. 144–150.
9. Месяц Г. А. О природе “эффекта Воробьевых” в физике импульсного пробоя твердых диэлектриков // Письма в ЖТФ. — 2005. — Т. 31. — № 24. — С. 51–59.
10. Жерлицын А. А., Алексеенко В. М., Кумпяк Е. В. Электрофизические установки для электроразрядной технологии дробления материалов // *Materials. Technologies. Design*. — 2023. — Т. 5. — № 4 (14). — С. 97–114.
11. Усов А. Ф., Бородулин В. В. Электротехническое обеспечение электроимпульсного способа разрушения материалов: проблема и пути решения // Сб. тр. “Неделя горняка–2007”. — 2007. — С. 164–170.
12. Huang W. and Chen Y. The application of high voltage pulses in the mineral processing industry — A review, *Powder Technol.*, 2021, Vol. 393. — P. 116–130.
13. High voltage pulse power machines — SELFRAG AG. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.selfrag.com/high-voltage-pulse-power-machines>.
14. Finkelstein G. A. and Shuloyakov A. D. On prospects of electric pulse disintegration from energy balance standpoint, *Miner. Proc. Extractive Metal. Rev.*, 1996, Vol. 16, No. 3. — P. 167–174.
15. Курец В. И., Филатов Г. П., Юшков А. Ю. Дробление кимберлита электроимпульсным способом // Материалы Междунар. совещ. Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения–2013). — 2013. — 535 с.
16. Burkin V. V., Kuznetsova N. S., and Lopatin V. V. Dynamics of electro burst in solids: I. Power characteristics of electro burst, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2009, Vol. 42, No. 18. — 185204.
17. Wang E., Shi F., and Manlapig E. Pre-weakening of mineral ores by high voltage pulses, *Miner. Eng.*, 2011, Vol. 24, No. 5. — P. 455–462.
18. Wang E., Shi F., and Manlapig E. Mineral liberation by high voltage pulses and conventional comminution with same specific energy levels, *Miner. Eng.*, 2012, Vol. 27–28. — P. 28–36.

Поступила в редакцию 02/X 2024

После доработки 03/IX 2024

Принята к публикации 08/XI 2024