

УДК 546.34

ЛИТИЕВЫЙ БУМ: ИСТОЧНИКИ ЛИТИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РОССИЙСКОЙ ЛИТИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

© 2023 г. А. Ю. Цивадзе^а, *, А. А. Бездомников^а, Г. В. Костикова^а

^аИнститут физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,
Ленинский проспект, д. 31, корп. 4, Москва, 119071 Россия

*E-mail: atsiv43@mail.ru

Поступила в редакцию 28.05.2023 г.

После доработки 02.06.2023 г.

Принята к публикации 10.06.2023 г.

Взрывное развитие возобновляемой энергетики в последние годы приводит к перекраиванию геополитической картины мира. Символом нового энергоперехода стали всеми узнаваемые солнечные панели и ветрогенераторы, в то время как литий-ионные аккумуляторы стали его основой и драйвером развития. Именно литий-ионные аккумуляторы позволили преодолеть главную проблему возобновляемой энергетики – непостоянство и неконтролируемость. В статье освещается литиевая проблема, причины волатильности цен на литий, основные источники лития и сложности его добычи. Помимо этого, рассмотрены перспективы развития литиевой промышленности России и актуальные отечественные разработки в технологиях добычи лития.

Ключевые слова: литий, минеральное литиевое сырье, гидроминеральное литиевое сырье, отработавшие литий-ионные аккумуляторы, экстракция, сорбция

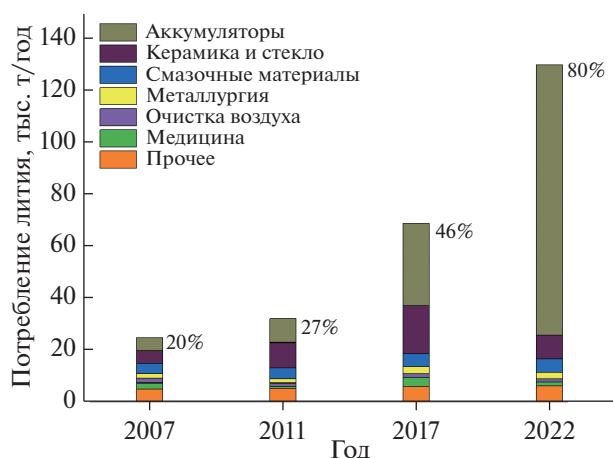
DOI: 10.31857/S001677702305009X, **EDN:** YPBORA

Литиевые источники тока являются неотъемлемой частью портативной электроники, электромобилей, беспилотных устройств, которые все больше заполняют нашу жизнь. Оптимальное сочетание эксплуатационных характеристик и большие перспективы совершенствования литиевых источников тока позволяют с уверенностью заявлять, что литиевый бум будет сопровождать нас на протяжении всего 21 века. Не стоит также забывать, что литий применяется не только при производстве аккумуляторов, но и в атомной энергетике, фармацевтике, металлургии, а также в керамике, стеклах, смазочных материалах и системах очистки воздуха.

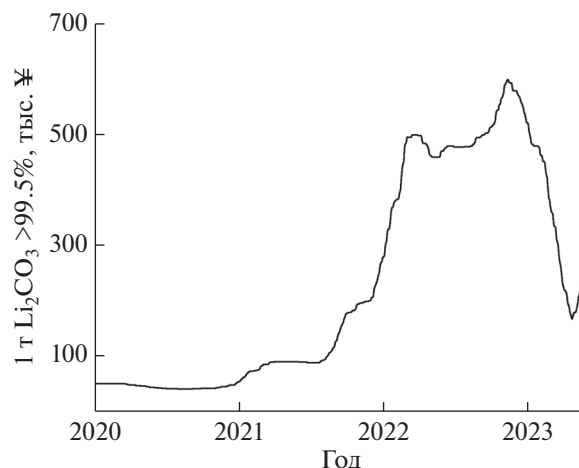
Возобновляемая энергетика, портативные устройства, электромобили, беспилотники и, в конце концов, литий – все это будет являться основой экономики государств будущего. Страны, не владеющие технологиями добычи лития и литиевыми производствами, не смогут занять лидирующие позиции в грядущем будущем. Такую перспективу понимают и осознают развитые страны, что подстегивает конкуренцию международных компаний за литиевые месторождения, за технологии добычи лития и за производства литиевых аккумуляторов. Наибольшие успехи достигаются в такой борьбе с применением мягкой силы: путем различных способов поддержки оте-

чественных исследователей, специалистов, компаний; привлечения высококвалифицированных специалистов; мер экономического стимулирования (гранты, инвестиции, субсидии). Академическая мобильность при должной политике государства позволяет проводить “перекачку мозгов” и в обратном направлении, забирая при этом ценный опыт работы отечественных специалистов за рубежом. Наглядным примером умелого использования академической мобильности является Китай, который смог таким образом развить отечественный технологический сектор.

Структура потребления лития за последние десятилетия изменилась кардинально, и в настоящее время 80% всего добытого лития идет на производство литий-ионных аккумуляторов (фиг. 1). Такие изменения, как уже было сказано, связаны с их значительной ролью в новом энергопереходе, при котором литий часто именуют новым золотом или новой нефтью. Исходя из данных геологической службы США, за период с 2007 по 2022 гг. (фиг. 1) производство лития возросло с 25 тыс. т/год до 130 тыс. т/год. Доля лития, направленного на производство аккумуляторов, практически линейно возрастала с 20 до 80%. В свою очередь, стоит отметить, что большой спрос на литий сталкивается с ограниченным предложением, что наглядно демонстрирует биржевая стоимость кар-



Фиг. 1. Структура потребления лития по годам.



Фиг. 2. Исторические данные стоимости Li₂CO₃ аккумуляторного сорта на Шанхайской фьючерсной бирже.

боната лития (фиг. 2). 2022 год стал настоящим индикатором острого дефицита лития на рынке, цена на него взлетела с 33 тыс. юань (минимум 2020 года) до 600 тыс. юань за тонну Li₂CO₃. К началу 2023 года цена на литий скорректировалась до 160 тыс. и продолжила новый активный рост.

С чем же связана столь высокая волатильность цен на литий, ведь литий является весьма распространенным химическим элементом на земле (кларк лития 3.2×10^{-3} мас. %) и не причисляется к редким элементам? Физико-химические свойства соединений лития являются и его преимуществом в практическом применении, и его недостатком в процессах добычи. Добыча лития это весьма сложная и нетривиальная задача по следующим причинам:

- Более 90% всего лития на земле находится в мировом океане и морской воде, непригодных в настоящее время для добычи лития.
- Отставание в технологиях добычи, поскольку до сих пор литиевая промышленность держится на оборудовании и технологиях прошлого века.
- Часто высокое содержание в сырье близких по свойствам с литием элементов, из-за чего задача извлечения лития подобна поиску иголки в стоге сена.
- Очень ограниченный выбор литий-селективных экстрагентов и сорбентов.

Проблемы в добыче лития в сочетании с высоким спросом являются причиной дефицита лития и позволяют, с некоторыми оговорками, обсуждать проблему добычи лития наравне с добычей редких металлов и с процессами разделения близких по свойствам редкоземельных элементов.

Мировые запасы лития составляют порядка 230 млрд тонн, в то время как в минеральных источниках находится около 65 млн т, из них лишь 15 млн т доступны к эксплуатации на уровне со-

временных технологий и экономической целесообразности (Vikström et al., 2013). Запасы лития в гидроминеральных источниках оцениваются в 112 млн т, большая часть из них состоит из весьма бедных месторождений, граничащих по своему составу с морской водой (Vikström et al., 2013).

В России, по оценке Геологической службы США, лития не менее 1 млн т, поровну между минеральными и гидроминеральными источниками (Jasinsk, 2023). Оценки отечественных исследователей указывают на значительно большие запасы лития в России (Boyarko et al., 2022; Толкушина и др., 2012). Доказанные минеральные запасы составляют не менее 1.65 млн т, в свою очередь гидроминеральные ресурсы лития ранее изучались лишь на уровне их прогнозирования, и лишь по геофизическим данным запасы лития на одном только Знаменском месторождении должны составлять порядка 4.2 млн т (при объеме рассола 9.8 млн м³ и средней концентрации 0.42 г/л по литию) (Толкушина и др., 2012). Исходя из этих оценок, Россия занимает уже 5-е место среди стран по запасам лития на уровне запасов в Китае (6.8 млн т) и в Австралии (7.9 млн т), входящих в тройку лидеров по его добыче (Jasinsk, 2023). Преимущественно весь литий России должен находиться в гидроминеральных источниках.

В работе (Boyarko et al., 2022) представлена наиболее детальная на настоящий момент карта разведанных Российских месторождений лития. Минеральные литиеносные провинции встречаются на Кольском полуострове, Южном Урале, в Алтайском крае, в Кемеровской области, в Республике Тыве, в районе Восточных Саян, Забайкальском крае и Якутии, а также на границе с Китаем в ЕАО, Хабаровском и Приморском краях. Гидроминеральные месторождения в большин-

Таблица 1. Общие характеристики литийсодержащих минералов

Название	Формула	Содержание Li, мас. %	Твердость по шкале Мооса	Плотность, кг/м ³
Эвкрипит	LiAlSiO ₄	5.51	6.5	2.6–2.7
Сподумен	LiAlSi ₂ O ₆	3.73	6.5–7	3.1–3.2
Петалит	LiAlSi ₄ O ₁₀	2.09	6–6.5	2.4–2.5
Лепидолит	KLi ₂ Al(Al,Si) ₃ O ₁₀ (F,OH) ₂	3.58	2.5–3	2.8–2.9
Амблигонит	(Li,Na)AlPO ₄ (F,OH)	3.44	5.5–6	3.0–3.1
Циннвальдит	KLiFe ₂ + Al(AlSi ₃)O ₁₀ (F,OH) ₂	1.59	3.5–4	2.9–3.0
Жадарит	LiNaSiB ₃ O ₇ (OH)	3.16	4–5	2.5
Гекторит	Na _{0.3} (Mg,Li) ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	0.53	1–2	2.5

стве случаев — подземные воды (геотермальные и техногенные рассолы) — представлены крупными Крымско-Северокавказским, Прикаспийским и Ангаро-Ленским литиеносными бассейнами и рядом других индивидуальных месторождений. Действующие предприятия по добыче лития находятся в поселке имени Малышева (Свердловская область) и на Знаменском месторождении. В СМИ присутствует информация об организации производств на Ковыктинском месторождении и на Кольском полуострове. Стоит также отметить, что на фоне развития литиевой тематики в России и благоприятной политико-экономической конъюнктуры в настоящее время активно реализуется более 100 новых геологоразведочных проектов (Boyarko et al., 2022).

Помимо минеральных и гидроминеральных источников, перспективным источником лития является вторичное сырье, формируемое преимущественно из отработавших литий-ионных аккумуляторов.

Можно рассчитать, что за этот период было произведено аккумуляторов, суммарно содержащих в себе порядка 500 тыс. т лития. Большая часть этого лития будет формировать вторичную сырьевую базу, которая некоторое время будет расти до момента насыщения потребительского рынка и постоянно пополняться. При организации эффективного сбора и переработки отработавших литий-ионных аккумуляторов можно достичь замыкания товарно-сырьевого цикла, что обеспечит возобновляемость литиевых ресурсов.

Минеральное литиевое сырье, как правило, классифицируют по содержанию тех или иных пород. Примеры литийсодержащих минералов и их характеристики представлены в табл. 1. Амблигонит, эвкрипит, лепидолит, петалит, сподумен и циннвальдит относятся к пегматитам, а гекторит и ядарит — к глиноподобным минералам. С промышленной точки зрения наиболее выгодными источниками являются месторождения, содержащие сподумен, которые преоблада-

ют в России. В действительности в рамках одного месторождения встречается целый набор литиевых минералов, например эвкрипит, образующийся при естественных геологических процессах и являющийся вторичным продуктом сподумена, чрезвычайно богат литием.

Представленное содержание лития в каждом из минералов соответствует “чистому” минералу, очевидно, что месторождения могут содержать разное количество тех или иных минералов и качество месторождения зависит от доли пустой породы, от присутствия других ценных компонентов или компонентов, мешающих добыче, а также от транспортной доступности и климатических условий. Большая часть Российских месторождений уступает по всем этим показателям, например, Австралийским минеральным месторождениям. Однако истощение наиболее рентабельных минеральных месторождений в других странах — один из решающих факторов перехода на менее рентабельные месторождения, типичные для России.

Степень извлечения лития из минерального сырья классическими технологиями составляет 60–70%, и основные затраты производства связаны с большим расходом реактивов и расходом электроэнергии на всех стадиях, включая шихтование, выщелачивание, концентрирование и карбонатное осаждение. В процессах добычи лития вопрос селективности рассматривается редко из-за низкого содержания близких по свойствам с литием элементов, в основном акцентируют внимание на этапе обогащения руд и снижении энергозатрат в процессах выщелачивания.

Классификация гидроминеральных источников сырья или литиевого гидроминерального сырья (ЛГМС) более разнообразна из-за их значительных отличий. Рассолы из соленых озер содержат в себе большой спектр катионов и анионов, как правило, это хлориды, сульфаты и карбонаты щелочных и щелочноземельных металлов. В случае рассолов, содержащих сульфаты и карбонаты, или регулярно омывающих сульфатные и карбо-

Таблица 2. Компонентный состав аккумуляторов различного типа (18650 без стальной капсулы) (Wang et al., 2014)

Компонент	Литий-кобальт оксидный LCO или ICR	Литий-железо фосфатный LFP	Литий-марганец оксидный LMO	Литий-никель-марганец-кобальт оксидный NMC
Li, %	2.4	1.8	1.8	1.4
Co, %	20.7	0.0	0.0	11.7
Mn, %	0.0	0.0	24.4	10.9
Ni, %	1.5	0.0	0.0	11.7
Fe, %	0.0	14.6	0.0	0.0
Cu, %	8.7	12.3	1.3	9.4
Al, %	6.2	9.8	1.3	6.4
Прочее, %	60.3	61.5	71.1	48.6

натные породы, содержание щелочноземельных металлов может быть крайне низким, в таком случае рассолы преимущественно содержат литий, натрий и калий.

Достаточно полная классификация ЛГМС приведена в работе (Рябцев, 2011). Согласно этой классификации, все известное в мире литий-содержащее гидроминеральное сырье можно разделить на две большие группы: ЛГМС, залегающее в районах с ярко выраженным аридным климатом, и ЛГМС, залегающее в районах с не аридным климатом. Далее автор разделяет рассолы на целевые (содержание лития выше 0.01 г/л) и нецелевые (менее 0.01 г/л), исходя из возможности промышленной переработки этих рассолов. Целевые рассолы разделяются на рассолы с повышенным содержанием лития (выше 0.10 г/л) и на рассолы с невысоким содержанием лития (0.01–0.10 г/л). Исходя из конкретного состава каждого целевого ЛГМС можно разделить на сырье, концентрируемое упариванием по галургической схеме до содержания лития более 10 г/л (традиционное ЛГМС), незначительно концентрируемое до содержания лития не выше 1.5 г/л и не концентрируемое по литию упариванием по галургической схеме (нетрадиционное ЛГМС).

В условиях аридного климата возможна организация концентрирования ЛГМС в естественных условиях (например, гелиоконцентрирование) с минимальными энергозатратами. Согласно карте аридного климата, составленной в соответствии с классификацией климатов Кеппена–Гейгера, в России отсутствуют месторождения, залегающие в районах с ярко выраженным аридным климатом.

На основе рассмотренной классификации и представленных в литературе данных по составу ряда месторождений ЛГМС России (табл. 1) можно сделать вывод, что в России присутствует ЛГМС хлоридно-натриевого и хлоридно-кальциевого типа, залегающее в районах неаридного климата, с содержанием лития не более 0.5 г/л.

В случае с литиевыми источниками тока классификация вторичного сырья намного проще.

Аккумуляторы являются рукотворным изобретением человека, и каждый из них имеет известный состав (табл. 2.). Исходя из принципа их работы можно выделить наиболее распространенные литий-ионные и наименее распространенные литий-металлические и литий-воздушные аккумуляторы. Долгое время не было четких стандартов и внешних атрибутов литиевых аккумуляторов, что затрудняло их сбор, сортировку и дальнейшую переработку. В последнее время производители стремятся выпускать единообразные аккумуляторы с окраской, характеризующей их качественный состав, существует общедоступная база информации о цилиндрических аккумуляторах, созданная энтузиастами (Cell Database ...).

В настоящее время большая часть отработавших литий-ионных аккумуляторов — это аккумуляторы, произведенные в период с 2000-ых по 2020 гг., и они трудно поддаются сортировке, поэтому их обычно разделяют на плоские (от мобильных телефонов и от части ноутбуков), цилиндрические (от электромопедов, электронных сигарет, инструмента и переносных внешних источников тока), а также аккумуляторы от ноутбуков. Предварительная сортировка вручную не всегда позволяет отделить литиевые аккумуляторы от Ni–Cd-аккумуляторов, которые раньше часто использовали в портативной технике. В ближайшем будущем, когда полностью выйдут из оборота нестандартные аккумуляторы, их сортировку и прямую разборку возможно будет осуществлять автоматически с вторичным использованием компонентов и минимальным воздействием на окружающую среду.

Таким образом, существует всего 3 источника лития: природные и техногенные рассолы, минеральные или рудные месторождения, отработавшие литий-ионные аккумуляторы. Технологии добычи лития из твердых источников включают в себя различные пирометаллургические и/или гидрометаллургические процессы. Получаемые таким образом литийсодержащие растворы можно отнести к техногенным литийсодержащим рассолам, и дальнейшее выделение лития, с некоторыми ого-

ворками, можно рассматривать параллельно с выделением лития из природных рассолов.

Каковы позиции России в литиевом вопросе и какие перспективы? Как уже было сказано, Россия имеет большие залежи лития, сопоставимые с мировыми литиевыми гигантами. Однако в процессе глубоких структурных преобразований 90-х гг. прошлого века литиевая промышленность оставалась в своем развитии. Несмотря на это, настоящая экономическая и политическая конъюнктура способствует возрождению Российской литиевой промышленности.

К настоящему моменту известно о ряде перспективных проектов: РОСАТОМ совместно с Норникелем планируют создание предприятий по добычи лития из минеральных источников сырья на Кольском полуострове, Газпром совместно с Иркутской нефтяной компанией (ИНК) планируют добычу лития на Ковыктинском газоконденсатном месторождении, также формируются проекты по переработке отработавших литий-ионных аккумуляторов. Однако отечественные технологии добычи лития, активно использовавшиеся во времена СССР, не применимы в современных реалиях и могут оказаться малорентабельными. В свою очередь, ни одна иностранная компания не станет продавать лицензии на по-настоящему революционные или высокоэффективные технологии. Также доступные зарубежные технологии могут лишь временно удовлетворить потребность в литии и принести незначительную прибыль без перспектив развития. Решение может быть найдено лишь при развитии новых отечественных технологий.

На сегодняшний день существует два направления развития Российских технологий извлечения лития: сорбционное и экстракционное. В частности, одним из актуальных решений, предлагаемых Российскими специалистами, является технология на основе алюминий-содержащих сорбентов, разработанных при кооперации Сибирских ученых под началом д.х.н. Коцупало Н.П. из Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (Менжерес, 2004; Коцупало, 2013; Рябцев и др., 2020). Эту технологию активно развивают в последние годы независимо друг от друга в ООО “Экостар-Наутех” и ГЕОХИ РАН.

С точки зрения крупнотоннажного производства наиболее перспективным является развитие экстракционных процессов выделения лития, так как они значительно превосходят сорбционные процессы по своей производительности. Уникальность экстракционного метода состоит еще и в том, что на его базе можно создать унифицированную технологию извлечения лития с минимальным количеством стадий переработки.

Экстракционное направление активно развивается в Институте физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина (ИФХЭ РАН), где был разработан ряд новых литий-селективных экстрагентов (Ivanova et al., 2019; Solov'ev et al., 2021;

Tsivadze A.Y. et al., 2022; Bezdomnikov et al., 2023; Kireeva, 2023), которые в сравнении с существующими аналогами имеют лучшие экстракционные характеристики и более низкую стоимость. На основе новых литий-селективных экстрагентов разработаны способы селективного извлечения лития из рассолов литий-натриевого и литий-кальциевого типов, которые составляют литиевые гидроминеральные источники сырья, а также образуются в процессах переработки минерального сырья. Таким образом, наработки ИФХЭ РАН позволяют создать исключительно экстракционную технологию добычи лития из техногенных (продукты выщелачивания минерального сырья и отработавших литий-ионных аккумуляторов, попутные воды, тампонажные рассолы) и природных (геотермальные воды, соленые озера) рассолов, обладающую следующими преимуществами:

- Высокая скорость, производительность и непрерывность процесса;
- Значительная экономия энергии и ресурсов на этапах концентрирования и осаждения;
- Экстрагент экологически безопасен и используется многократно;
- Возможность организации безотходного производства;
- Высокое качество (аккумуляторный сорт) получаемой литиевой продукции;
- Низкий расход реактивов в сравнении с карбонатными и сорбционными процессами.

В целом в последние годы все больше научных групп и организаций начинают вносить свой вклад в развитие Российской литиевой тематики, не только в разработке новых литий-селективных экстрагентов и способов добычи лития (Гарипова и др., 2018; Kalmykov, 2021; Milevskii et al., 2022; Nesterov, Zakurdaeva, 2022), но и в разработке литиевых источников тока (Корнев и др., 2022; Kulova et al., 2022; Чирков и др., 2022a, 2022b). Параллельно с этим активно развиваются производство электромобилей и беспилотных устройств. Все эти процессы приводят к увеличению внутреннего спроса и предложения литиевой продукции и открывают большие перспективы развития литиевой промышленности в России. В задачи государства должно входить наращивание поддержки этих начинаний и создание благоприятных условий для развития отечественных технологий, науки и промышленности. Однако в настоящее время на основе имеющихся литературных данных невозможно провести качественный и количественный анализ технико-экономических показателей предложенных решений с точки зрения производительности, технологичности, экономичности и экологичности. Настало время безотлагательно провести экспертизу всех предложенных решений на уровне Российской академии наук на основе разработанных четких критериев оценки необходимых показателей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (номер проекта 122011300052-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гарипова А.Р. и др. Мембранная экстракция ионов лития и натрия О-(2-этилгексил)-п,п-бис(2-этилгексил)аминометилфосфоновой кислотой // Ж. общей химии. 2018. Т. 88. № 1. С. 126–130.
- Корнев П.В. и др. Титанат лития, допированный европием, как анодный материал для литий-ионных аккумуляторов // Ж. физической химии. 2022. Т. 96. № 2. С. 294–301.
- Коцупало Н.П. и др. Влияние структурных факторов на сорбционные свойства хлорсодержащей разновидности двойного гидроксида алюминия лития // Ж. прикладной химии. 2013. Т. 86. № 4. С. 518–524.
- Менжерес Л.Т., Рябцев А.Д., Мамылова Е.В. Селективный сорбент для извлечения лития из хлоридных высокоминерализованных рассолов // Изв. Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 7. С. 76–80.
- Рябцев А.Д. и др. Научные основы производства селективного к литию сорбента и промышленной технологии извлечения хлорида лития из гидроминерального поликомпонентного сырья // Технология неорганических веществ и материалов. 2020. № 8. С. 338–352.
- Рябцев А.Д. Переработка литиеносного поликомпонентного гидроминерального сырья на основе его обогащения по литию. Новосибирск, 2011.
- Толкушина Е.А., Торикова М.В., Комин М.Ф. Минерально-сырьевая база лития: проблемы развития и использования // Геологоразведка и сырьевая база. 2012. Т. 2. С. 7.
- Чирков Ю.Г. и др. Гальваностатический разряд литий-кислородного аккумулятора: влияние толщины активного слоя на характеристики положительного электрода // Электрохимия. 2022а. Т. 58. № 1. С. 3–12.
- Чирков Ю.Г. и др. Литий-кислородный (воздушный) аккумулятор: о возможности улучшения характеристик процесса разряда // Ж. физической химии. 2022б. Т. 96. № 5. С. 724–732.
- Bezdomnikov A.A. et al. Liquid extraction of lithium using a mixture of alkyl salicylate and tri-n-octylphosphine oxide // Sep. Purif. Technol. 2023. V. 320. P. 124137.
- Boyarko G.Y., Khatkov V.Y., Tkacheva E. V. Lithium Raw Potential in Russia // Bull. Tomsk Polytech. Univ. Geo Assets Eng. 2022. V. 333. № 12. P. 7–16.
- Cell Database [Electronic resource]. URL: <https://secondlifestorage.com/index.php?pages/cell-database/>.
- Ivanova I.S. et al. 2,4,6-Tris[2-(diphenylphosphoryl)-4-ethylphenoxy]-1,3,5-triazine: A new ligand for lithium binding // Inorganica Chim. Acta. Elsevier. 2019. V. 497. P. 119e095.
- Jasinsk S.M. Mineral Commodity Summaries // Mineral Commodity Summaries 2023. 2023. P. 108–109.
- Kalmykov D. et al. Operation of three-stage process of lithium recovery from geothermal brine: Simulation // Membranes (Basel). 2021. V. 11. № 3. P. 1–21.
- Kireeva N., Baulin V.E., Tsvadze A.Y. A Machine Learning-Based Study of Li⁺ and Na⁺ Metal Complexation with Phosphoryl-Containing Ligands for the Selective Extraction of Li⁺ from Brine // Chem. Engineering. 2023. V. 7. № 3. P. 41.
- Kulova T.L. et al. Binder-Free Ge-Co-P Anode Material for Lithium-Ion and Sodium-Ion Batteries // Batteries. 2022. V. 8. № 8. P. 98.
- Milevskii N.A. et al. Separation of Li(I), Co(II), Ni(II), Mn(II), and Fe(III) from hydrochloric acid solution using a menthol-based hydrophobic deep eutectic solvent // Hydrometallurgy. 2022. V. 207. P. 105777.
- Nesterov S. V., Zakurdaeva O.A. Targeted preparation of highly efficient lithium extractants based on 14-membered crown ethers // Mendelev Commun. 2022. V. 32. № 5. P. 670–671.
- Solov'ev V., Baulin D., Tsvadze A. Design of phosphoryl containing podands with Li⁺/Na⁺ selectivity using machine learning // SAR QSAR Environ. Res. Taylor and Francis Ltd. 2021. V. 32. № 7. P. 521–539.
- Tsvadze A.Y. et al. A New Extraction System Based on Isopropyl Salicylate and Trioctylphosphine Oxide for Separating Alkali Metals // Molecules. 2022. V. 27. № 10. P. 3051.
- Vikström H., Davidsson S., Höök M. Lithium availability and future production outlooks // Appl. Energy. Elsevier Ltd, 2013. V. 110. P. 252–266.
- Wang X. et al. Economic and environmental characterization of an evolving Li-ion battery waste stream // J. Environ. Manage. 2014. V. 135. P. 126–134.