

УДК 553:661.834

СЫРЬЕВОЙ ПОТЕНЦИАЛ ЛИТИЯ РОССИИ

Боярко Григорий Юрьевич¹,
gub@tpu.ru

Хатьков Виталий Юрьевич^{1,2},
V.Khatkov@adm.gazprom.ru

Ткачева Евгения Владимировна¹,
belayaev@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² ПАО «Газпром»,
Россия, 196143, г. Санкт-Петербург, пл. Победы, 2.

Актуальность работы обусловлена проблемами тотальной импортозависимости России по литиевым сырьевым материалам при отсутствии национальной добычи этого критического сырья.

Цель: изучение сырьевой базы лития России и перспектив национального производства его добычи.

Методы: контент-анализ всей информации по тематике минерально-сырьевой базы лития России.

Результаты. В настоящее время состояние российской отрасли производства литиевой продукции характеризуется отсутствием национальной добычи литиевого сырья и тотальной импортозависимостью по карбонату лития. Устойчиво растущий спрос на литий со стороны производителей аккумуляторов, вызвавший беспрецедентный рост мировых цен на литиевые продукты, создает благоприятные предпосылки для активизации отечественной литиевой индустрии. Воссоздание национальной добычи стратегического литиевого сырья с целью его импортозамещения возможно, в первую очередь, введением в эксплуатацию гидроминеральных месторождений подземных рассолов в инфраструктурах действующих добывающих нефтегазовых предприятий и других хозяйствующих субъектов. Наиболее перспективен пилотный проект попутной добычи лития на Ковыктинском месторождении газа в Восточной Сибири. Известные подготовленные месторождения традиционного технологического типа сподуменовых пегматитов в России длительное время были малопривлекательны по морально и технически устаревшим технико-экономическим показателям и лишь в условиях резкого роста цен на литиевые продукты в 2021–2022 гг. к ним возобновился интерес инвесторов. В условиях высоких цен на литиевое сырье становятся привлекательными и проекты разработки месторождений сподуменовых пегматитов, в первую очередь – Колмозерского месторождения в Мурманской области. Необходимо сделать переоценку известных российских месторождений сподуменовых пегматитов близ развитых промышленных инфраструктур с учетом современных экономических условий и новых технологий переработки литиевого сырья. Новые геологоразведочные работы могут привести к обнаружению новых месторождений сподуменовых пегматитов, что и реализуется на примере опоскования Ташеглинской площади в Кемеровской области.

Ключевые слова:

Литий, стратегическое сырье, импортозависимость, сподуменовые пегматиты, гидроминеральные месторождения, проекты.

Введение

Литиевое сырье используется для обеспечения производства литиевых продуктов, применяемых в алюминиевой промышленности (в электролизе глинозема, легировании алюминия) [1], в атомной энергетике (теплоноситель, аккумуляция водорода) [2], в стеклокерамике (метасиликаты лития) [3], в смазочных материалах [4], в электрических элементах питания (электролиты и аноды) [5]. Последнее направление использования литиевых продуктов является самым быстро растущим по объемам потребления [6].

Литий, используемый в технологиях атомной энергетике [2], входит в перечень стратегических видов минерального сырья (Распоряжение Правительства РФ от 16 января 1996 г. № 50-р). В период плановой экономики в СССР добывалось 40–50 тыс. т литиевого (сподуменового) концентрата (1,5–1,8 тыс. т в пересчете на литий), но в 1997 г. единственное добывающее предприятие (Забайкальский ГОК, разрабатывающий Завитинское месторождение сподуменовых пегматитов в Забайкальском крае), было оста-

новлено ввиду выработки рентабельных запасов. Государство в 1997–2012 гг. в Федеральной целевой программе «Добыча, производство и потребление лития и бериллия. Развитие производства тантала, ниобия и олова на предприятиях Министерства Российской Федерации по атомной энергии» (Постановление Правительства РФ от 10.11.1996 г. № 1345), поддерживало инициативы возрождения Забайкальского ГОК, но ввиду ограниченности финансирования эти работы в 2002 г. были прекращены. Спрос же на литиевые продукты для внутренних потребностей полностью удовлетворялся за счет импорта. Для переработки импортировалось до 8,8 тыс. т/год карбоната лития, из них производится до 8,5 тыс. т/год оксидов и гидрооксидов лития, из которых только до 1,7 тыс. т/год приходится на внутреннее потребление. Избыток произведенного продукта направлялся на экспорт, обеспечивая тем самым работоспособность литиевой отрасли России в сложных политических условиях.

Мировое потребление лития в начале 1990-х гг. составляло 9–10 тыс. т/год 100 % Li, в дальнейшем

наблюдался плавный рост потребления до 26 тыс. т 100 % Li в 2015 г., после чего произошел взрывной рост востребованности литиевых продуктов для производства электрических элементов питания до 100 тыс. т 100 % Li в 2021 г. [2–14]. В России в это же время увеличились объемы производства оксидов и гидроксидов лития из импортного сырья (с 1,0 тыс. т в 2007 г. до 10,3 тыс. т в 2021 г.), большая часть которых отправляется на экспорт, обеспечивая тем самым работоспособность российской перерабатывающей литиевой отрасли.

Вопрос снижения импортозависимости стратегического литиевого сырья в новых условиях роста востребованности конечных литиевых продуктов на внутреннем российском рынке потребления [15] весьма актуален, и он может быть решен путем создания национальных добывающих производств на основе имеющихся объектов минерально-сырьевой базы лития.

Методика

Проведен контент-анализ научных источников литературы, национальных зарубежных и российских отчетов и докладов, периодических изданий, посвященных тематике минерально-сырьевой базы лития России. Ресурсы лития отдельных месторождений оценивались по известным средним содержаниям LiO_2 и объемам руды или по их долям в суммарных запасах лития России.

Минерально-сырьевая база литиевого сырья России

Промышленно значимые месторождения лития представлены двумя минеральными и одним геотехнологическим типами:

- литиеносные (сподуменовые) и комплексные (Li, Be, Nb, Ta, Sn) пегматиты [16, 17];
- редкометалльные апогранитные метасоматиты (оловоносные циннвальдитовые грейзены, бериллиеносные олигоклаз-флогопитовые грейзены, слюдисто-флюоритовые метасоматиты) в комплексных месторождениях (Be, Nb, Ta, Sn, флюорит) с попутной литиевой минерализацией (лепидолит, циннвальдит, поллуцит, полилитионит, литиевый мусковит, амблигонит) [18, 19];
- гидроминеральные литиеносные рапы озер и рассолы подземных вод [20, 21].

Серьезной проблемой их освоения является учет запасов литиевых месторождений по устаревшим кондициям, основанных на недостаточно эффективных технологиях добычи, обогащения и переработки литиевого сырья, рассчитанных в старых масштабах цен, зачастую с пониженным порогом рентабельности. Примером реальности оптимизации старых проектов может быть пересчет технико-экономического обоснования разработки Туганского титанциркониевого месторождения (также полностью импортозависимых видов минеральных продуктов), где изменили пороговые кондиции и исключили из проекта производство невостребованного низкокачественного каолина, что позволило начать разработку этого месторождения [22].

Подготовленные минеральные ресурсы лития в 17 собственно литиевых (сподуменовых) и комплексных (Li, Be, Nb, Ta, Sn, флюорит) месторождениях оцениваются в 1650 тыс. т 100 % Li [17].

Завитинское месторождение *сподуменовых пегматитов* в Забайкальском крае [23] (рисунок) разрабатывалось в 1941–1997 гг. Его остаточные балансовые запасы составляют 210 тыс. т LiO_2 (95 тыс. т 100 % Li) при среднем содержании 0,69 % LiO_2 . В наличии также 20 млн т накопленных отвальных продуктов, содержащих 0,25–0,30 % LiO_2 ввиду низкого уровня извлечения в концентрат (40–60 %) [24]. Здесь возможны добычные работы остаточных балансовых запасов и переработка отвальных продуктов [25, 26].

Геологоразведочные работы произведены на месторождениях сподуменовых пегматитов в Кольской (Колмозерское, ресурсы 395 тыс. т 100 % Li при среднем содержании 1,14 % LiO_2 ; Полмостундровое, 165 тыс. т, 1,25 %; Вороньтундровое, 5 тыс. т, 0,9 %), Алтайской (Алахинское, 15 тыс. т, 0,71 %), Саянской (Гольцовое, 220 тыс. т, 0,79 %; Урицкое, 170 тыс. т, 1,09 %; Белореченское, 75 тыс. т, 1,12 %; Вишняковское, 20 тыс. т, 0,09 %) и Тувинской (Тастыгское, 280 тыс. т, 1,46 %) провинциях. Из них наиболее благоприятно к отработке Колмозерское месторождение (Мурманская область), расположенное близ действующего Ловозерского ГОК [26].

Наиболее значимое по качеству Тастыгское месторождение сподуменовых пегматитов в Республике Тыва еще на стадии разведки отнесено к забалансовым ввиду его нахождения в труднодоступной местности высокогорья. Аналогично вне развитой инфраструктуры находятся Гольцовое, Белореченское и Вишняковское (Иркутская область), Алахинское (Республика Алтай), Полмостундровое и Вороньтундровое (Мурманская область) месторождения.

В условиях значительного роста мировых цен на карбонаты лития (с 13 тыс. \$ США/т в 2018 г. до 75 тыс. \$ США/т в начале 2022 г.) ПАО «Росатом» совместно с ПАО «Норильский Никель» планируют разработку Колмозерского месторождения силами горнорудного дивизиона холдинга АО «Атомредметзолото», включая строительство карьера и обогатительной фабрики в районе месторождения, а также переработку в Мончегорске с использованием мощностей «Норникеля». Планируемый выпуск карбонатов и оксидов лития – до 50 тыс. т/год [27]. Уже возникают осложнения реализации проекта – только разовый взнос при получении лицензии на Колмозерское месторождение, рассчитанный по существующей методике [28], составляет 3,8 млрд р., а ведь еще требуется доразведка месторождения, переоценка ТЭО его разработки и только после этого разворачивание проекта добычи с ожидаемыми сроками начала выпуска продукции в 2026 г. [29]. Именно на примере ситуации с литием уже подготовлен проект уменьшения размера разового платежа за лицензию в 10 раз для редких металлов [30]. Для приближения сроков начала выпуска литиевого сырья желательным было бы сформировать менее затратный этап первой очереди эксплуатации месторождения с годовым выпуском карбоната лития до 10 тыс. т.



Рисунок. Месторождения лития, добывающие предприятия и предприятия, перерабатывающие литиевое сырье: 1 – минеральные литиеносные провинции (I – Кольская, II – Южно-Уральская, III – Алтайская, IV – Кузнецкая [Таштыгинская], V – Тувинская [Сангиленская], VI – Восточно-Саянская, VII – Забайкальская, VIII – Южно-Якутская [Тунгурчинская], IX – Приморская [Ханкайская]); 2 – гидроминеральные литиеносные бассейны (I – Крымско-Северокавказский, II – Прикаспийский, III – Ангаро-Ленский); 3 – пегматитовые месторождения лития (а – с подсчитанными запасами, б – с оцененными прогнозными ресурсами); 4 – месторождения других полезных ископаемых с попутной литиевой минерализацией; 5 – озера с литиеносной рапой; 6 – гидроминеральные месторождения лития; 7 – добывающие предприятия (а – действующие, б – остановившие производство)

Figure. Lithium deposits, mining enterprises and enterprises processing lithium raw materials: 1 – mineral lithium-bearing provinces (I – Kola, II – South Ural, III – Altai, IV – Kuznetsk [Tashtynginskaya], V – Tuva [Sangilenskaya], VI – East Sayan, VII – Trans-Baikal, VIII – South Yakutsk [Tungurchinskaya], IX – Primorskaya [Khankai]); 2 – hydrothermal lithium-bearing basins (I – Crimean – North Caucasus, II – Caspian, III – Angara-Lena); 3 – pegmatite lithium deposits (a – with calculated reserves, b – with estimated forecast resources); 4 – deposits of other minerals with associated lithium mineralization; 5 – lakes with lithium-bearing rapa; 6 – hydrothermal lithium deposits; 7 – mining enterprises (a – operating, b – stopped production)

Комплексные месторождения с попутной литиевой минерализацией представляют собой сложные по составу цирконий-ниобиевое Улуг-Танзекское (300 тыс. т 100 % Li, 0,08 % LiO₂), колумбит-пирохлоровые (Ta-Nb) Этыкинское (50 тыс. т, 0,11 %), Орловское (25 тыс. т, 0,27 %), Ачиканское (20 тыс. т, 0,31 %) месторождения, слюдисто-флюоритовые Вознесенское (25 тыс. т, 0,45 %) и Пограничное (5 тыс. т, 0,16 %) месторождения, а также Малышевское изумрудно-бериллиево-слюдяное (10 тыс. т 100 % Li, 0,16 % LiO₂) месторождение. На разрабатываемых месторождениях тантала и ниобия (Орловский и Этыкинский ГОК в Забайкальском крае), изумрудов (Малышевский ГОК в Свердловской области) и флюорита (Ярославский ГОК в Приморском крае) литиевые минералы (лепидолит, циннвальдит, поллцит, полилитонит, литиевый мусковит, амблигонит) учитывались как попутный компонент, но не извлекались. Все эти месторождения требуют переоценки в условиях изменений конъюнктуры добываемого сырья, ценовых трансформаций используемых ресурсов и применения новых возможностей технологий добычи и переработки литиевого сырья.

В настоящее время на фоне увеличения спроса на литиевое сырье и роста его цен в мире активизировался интерес и к рудным типам литиевого сырья, в частности к сподуменовым пегматитам, в настоящее время реализуется более 100 новых геологоразведочных проектов [31]. Необходимо сделать переоценку известных российских месторождений сподуменовых пегматитов близ развитых промышленных инфраструктур с учетом современных экономических условий и новых технологий переработки литиевого сырья. Также в России возможно обнаружение новых месторождений сподуменовых пегматитов, что и реализуется на примере опискования Ташеглинской площади в Кемеровской области [17].

Поисковые работы необходимо проводить на обнаружение не только сподуменовых месторождений, но и на лепидолитовое, циннвальдитовое, петалитовое сырье, а также на принципиально новые виды литиевого сырья (гекторитовые глины и ядарит, ставшие предметом инновационных проектов [32]).

Гидроминеральные ресурсы лития России ранее изучались лишь на уровне их прогнозирования.

По формации месторождений литиеносной озерной рапы на территории Российской Федерации про-

изводились специализированные работы, но в силу природно-климатических условий сделан вывод по бесперспективности их обнаружения [17]. Лишь на одном Марфинском озере в Крыму зафиксирована концентрация лития 50 мг/л [21].

Проводились попутные поиски лития в подземных водах в рассолах соленосных провинций и околонефтяных водах нефтегазовых месторождений, фиксировались высокие его концентрации, но оценки с позиции разработки литиеносных гидроминеральных месторождений не проводились. Единственное разведанное гидроминеральное месторождение лития – Знаменское в Иркутской области, с годовым дебетом рассолов 40,5 тыс. м³ при содержании Li₂O 420 мг/л, и на нем можно было бы извлекать до 80 т карбоната лития в год. Но владелец лицензии на это месторождение ООО «НПВФ «Брайнсиб» с оператором добычи ООО «Техрас» литиевые продукты из рассолов не извлекают [20].

Тем не менее гидроминеральные источники лития заслуживают серьезного внимания. Высокие концентрации лития зафиксированы в нефтяных водах ряда месторождений, в Восточной Сибири – Сухотунгуское (220 мг/л), Куюмбинское (290 мг/л), Кавыктинское (380 мг/л), Непско-Батуобинские (170 мг/л), Тетеро-Алтыбское (120 мг/л) [33–36], в Прикаспийском бассейне на Оренбургском месторождении (48 мг/л) [37], в дренажных водах алмазных месторождений – Трубка Удачная в Республике Саха-Якутия (150 мг/л) [36, 38], в изливах геотермальных источников – Берикейское (42 мг/л), Таруминское (195 мг/л) и Сухокумское (41 мг/л) месторождения в Республике Дагестан [39] и Пауджетское месторождение на Камчатке [40]. Потенциальные ресурсы лития по Восточной Сибири оцениваются в 5,5 тыс. т 100 % Li/год [36]. Здесь известны фонтанировавшие скважины с дебитом рассола до 5–7 тыс. м³/сут с выносом на поверхность до 10 т хлорида лития в сутки [36]. Кроме того, литиеносные рассолы содержат также высокие концентрации брома, йода и бора, которые можно попутно извлекать.

Предпосылками для освоения гидроминеральных месторождений лития является их нахождение в сфере действующих добывающих нефтегазовых предприятий и других хозяйствующих субъектов (добычи алмазов, соляных промыслов, геотермальных станций). Препятствиями этому являются недостаточная изученность этих месторождений с позиции их сырьевого обеспечения (сведений о фильтрационных свойствах горного массива, ожидаемых дебетов эксплуатационных скважин), осложнений технологий добычи (осаждения солей в скважинах, рассолопроводах и другом технологическом оборудовании, аномально высокое пластовое давление) и переработки гидроминерального сырья (сложности сорбции, десорбции и разделения полезных компонентов, наличия мешающих обогащению примесей, сложности утилизации отработанных рассолов). Требуется провести системные геологоразведочные работы на площадях известных гидроминеральных проявлений лития с оценкой их эксплуатационных, технологических и экономических параметров. Объектом добычи мо-

жет стать любое из известных гидроминеральных месторождений, доступных в сфере действующих предприятий.

Наиболее реален в ближайшее время пилотный проект добычи лития из гидроминерального сырья на Ковыктинском газовом месторождении ПАО «Газпром» – ведутся НОКР технико-экономической добычи лития (ООО «ИСТ Эксплорейшен») [15], заключено соглашение с ООО «Иркутская нефтяная компания» по реализации проекта по добыче и переработке пластовых рассолов для получения соединенного лития [41]. Проектом предусматриваются годовые объемы добычи карбоната лития на уровне 705 т/год (из одной добычной скважины), капитальные вложения (геологоразведочные работы, строительство добычной и поглощающей скважин, оборудование промысла и его монтаж, объекты инфраструктуры) оцениваются в 1,8 млрд р., эксплуатационные расходы – 238 млн р./год, ВНД проекта – 15,7 %, начало выпуска продукции – 2025 г. [42]. В дальнейшем возможно строительство дополнительных добычных скважин и, соответственно, кратное увеличение добычи. Возможно и сокращение сроков реализации этого пилотного проекта.

Требуется также продолжение ревизионных работ по оценке литиеносности попутных нефтяных вод во всех нефтегазовых провинциях России, а не только в пределах известных бассейнов литиеносных подземных вод.

ПАО «Росатом» предпринимает также попытки участия в проектах разработки гидроминеральных месторождений лития в Чили и Боливии [29]. В результате политических санкций сделка с канадской компанией Wealth Minerals Ltd по чилийскому проекту не состоялась, но в Боливии переговоры по участию российского холдинга в литиевых проектах продолжается.

Развитие технологий обогащения и переработки литиевого сырья

Одним из направлений увеличения объемов выпуска литиевых продуктов является улучшение показателей обогащения и переработки минерального и гидроминерального сырья [19, 32, 43, 44].

Массово используемая технология *обогащения сподуменовых руд* путем их отжига приводит к потерям в хвостах обогащения до 30–40 % от исходного сырья. Но появляются и принципиально новые технологии обогащения сподумена [16]. Технология обогащения сподуменовых руд с применением новых флотореагентов разработана во ВНИИХТ [32]. Для обогащения отвальных продуктов Завитинского месторождения предложен радиометрический способ обогащения [45]. В Канаде предложен тяжелосредный способ обогащения сподуменового концентрата [46]. В Австралии разработана гидрометаллургическая технология Sileach-процесса переработки сподумена без энергозатратной стадии отжига [43].

Лепидолитовый минеральный продукт, более сложный в обогащении и переработке, в настоящее время добывается на отдельных месторождениях в

Китае [47], Португалии и Зимбабве [31]. Повышению извлечения лепидолита способствуют новые флотационные реагенты, применяемые также на обогащении бедных отвалных продуктов [48]. Проводятся также исследования по извлечению лития из лепидолита методом биологического выщелачивания [49].

Переработка литиевых минералов (сподумена, пегматита, лепидолита и цинвальдита) на карбонат лития методом прямой карбонизации более экономична по сравнению с применяемой сернокислотной технологией [50]. В Канаде разработан метод переработки сподуменного концентрата путем повторяющегося хлорирования, с более низкими издержками производства по сравнению с сернокислотным методом [19]. Перспективен и процесс прямой переработки сподумена в оксиды лития [19].

Для извлечения из рапы озер и подземных вод *гидроминерального литиевого сырья* разрабатываются новые технологии и технологические решения, серьезно улучшающие уже известные переделы:

- использование селективных обратимых сорбентов лития [51, 52];
- сорбционные технологии комплексного извлечения полезных компонентов (включая литий) из нефтяных вод [53, 54];
- мембранная технология избавления рассолов от магния, осложняющего селективное извлечение из раствора лития [55].

Выводы

В настоящее время состояние российской отрасли производства литиевой продукции характеризуется отсутствием национальной добычи литиевого сырья и тотальной импортозависимостью по карбонату лития. Устойчиво растущий спрос на литий со стороны производителей аккумуляторов, вызвавший беспрецедентный рост мировых цен на оксиды лития, при сохраняющейся в обозримом будущем геополитической неопределенности создает благоприятные предпо-

сылки для активизации отечественной литиевой индустрии.

Гидроминеральные месторождения лития в подземных водах в России ранее не рассматривались как источник литиевого сырья.

Воссоздание национальной добычи стратегического литиевого сырья с целью его импортозамещения возможно, в первую очередь, введением в эксплуатацию гидроминеральных месторождений подземных рассолов в инфраструктурах действующих добывающих нефтегазовых предприятий и других хозяйствующих субъектов (добычи алмазов, соляных промыслов, геотермальных станций). Наиболее перспективен пилотный проект попутной добычи лития на Ковыктинском месторождении газа в Восточной Сибири.

Известные подготовленные месторождения традиционного технологического типа сподуменных пегматитов в России длительное время были малопривлекательны по морально и технически устаревшим технико-экономическим показателям и лишь в условиях резкого роста цен на литиевые продукты в 2021–2022 гг. к ним возобновился интерес инвесторов.

В условиях высоких цен на литиевое сырье в настоящее время становятся привлекательными и проекты разработки месторождений сподуменных пегматитов, в первую очередь – Колмозерского месторождения в Мурманской области. Необходимо также сделать переоценку других известных российских месторождений сподуменных пегматитов близ развитых промышленных инфраструктур с учетом современных экономических условий и новых технологий переработки литиевого сырья. Новые геологоразведочные работы могут привести к обнаружению новых месторождений сподуменных пегматитов, что и реализуется на примере опоскования Ташеглинской площади в Кемеровской области.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-28-01742).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nicholson P. Past and future development of the market for lithium in the World aluminium industry // *Energy*. – 1978. – V. 3. – № 3. – P. 243–246. DOI: 10.1016/0360-5442(78)90019-1
2. Ktalkherman M.G., Emelkin V.A., Pozdnyakov B.A. Production of lithium oxide by decomposition lithium carbonate in the flow of a heat carrier // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2009. – V. 43. – № 1. – P. 88–93. DOI: 10.1134/S0040579509010114.
3. Sheets J. New lithium market // *Ceramic Engineering and Science Proceedings*. – 2000. – V. 21. № 5. – P. 97–99.
4. Yang C.-H. Market game analysis between resource suppliers and downstream enterprises – based on lithium-base grease industry in China // *International Conference on Management Science and Engineering – 19th Annual Conference Proceedings*, 20–22 September 2012. – Code 956522012. – Article number 64142642012. – P. 757–761. DOI: 10.1109/ICMSE.2012.6414264.
5. Taylor D.R., Young R.I. Lithium use in batteries: demand and supply considerations. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2013. – 80 p.
6. Zhou P., Tang J.-R., Zhng T. Supply and demand prospect of global lithium resources and some suggestions // *Geological Bulletin of China*. – 2014. – V. 33. – № 10. – P. 1532–1538.
7. Swart P., Dewulf J., Biernaux A. Resource demand for the production of different cathode materials for lithium ion batteries // *Journal of Cleaner Production*. – 2014. – V. 84. – № 1. – P. 391–399. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.01.056.
8. Sanders M. Lithium-ion battery raw material supply and demand 2016–2025 // *Global Battery Raw Materials*. – San Francisco, 19–20 June 2017. – Code 139741. – P. 162–181.
9. Bailey M.P. Lithium battery demand drives process evolution // *Chemical Engineering (United States)*. – 2018. – V. 125. – № 4. – P. 14–19.
10. Lithium market research – global supply, future demand and price development / G. Martin, L. Rentsch, M. Höck, M. Bertau // *Energy Storage Materials*. – 2017. – V. 6. – P. 171–179. DOI: 10.1016/j.ensm.2016.11.004.
11. Zhang B., Yan N., Li W. Power market bidding strategy for lithium battery energy storage based on energy distribution // *Dianli Jianshe [电力建设] / Electric Power Construction*. – 2018. – V. 39. – № 5. – P. 138–142. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2018.05.017.
12. Supply and demand response trends of lithium resources driven by the demand of emerging renewable energy technologies in China / D. Liu, X. Gao, H. An, Y. Qi, X. Sun, Z. Wang, Z. Chen, F. An, N. Jia // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2019. – V. 145. – P. 311–321. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.02.043.
13. Exploring behavior changes of the lithium market in China: toward technology-oriented future scenarios / D. Liu, X. Gao, H. An, Y. Qi, Z. Wang, N. Jia, Z. Chen // *Resources Policy*. – 2020. – V. 69. – Article number 101885. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101885.

14. Лымарь В.К., Белоусова Е.Б. Мировой рынок литиевого сырья и соединений лития // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2021. – № 1–6. – С. 116–118.
15. Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года / Утв. Распоряжение Правительства РФ от 23.08.2021 N 2290-р // Собрание законодательства РФ, 30.08.2021, № 35, ст. 6327.
16. Spodumene: the lithium market, resources and processes / C. Dessemond, F. Lajoie-Leroux, G. Soucy, N. Laroche, J.-F. Magnan // Minerals. – 2019. – V. 9. – № 6. – Article number 334. DOI: 10.3390/min9060334.
17. Толкушкина Е.А., Торикова М.В., Комин М.Ф. Минерально-сырьевая база лития: проблемы развития и использования // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2012. – № 2. – С. 2–9.
18. Кременецкий А.А., Линде Т.П., Юшко Н.А., Шадрман Ф.И. Минеральное сырье. Литий. Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1999. – 49 с.
19. Li H., Eksteen J., Kuang G. Recovery of lithium from mineral resources: state-of-the-art and perspectives – a review // Hydrometallurgy. – 2019. – V. 189. – Article number 105129. DOI: 10.1016/j.hydromet.2019.105129.
20. Плотникова Р.И., Лукьянчиков В.М. Ресурсная база промышленных подземных вод и проблемы ее освоения // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2010. – № 5. – С. 2–7.
21. Ключарев Д.С., Михеева Е.Д. К вопросу о содержаниях лития и попутных компонентов в промышленных водах перспективных площадей территории России // Разведка и охрана недр. – 2020. – № 4. – С. 53–60.
22. Кабанов А.А., Ахмадшин Н.Ю. Туганское месторождение – первенец промышленной разработки титанциркониевых россыпей России // Горный журнал. – 2021. – № 10. – С. 54–64.
23. Голиков А.С. Завитинское месторождение // Записки Ленинградского горного института. – 1953. – Т. XXVIII. – С. 59–102.
24. Воссоздание сырьевой базы литиевой промышленности в Российской Федерации / Г.А. Сарычев, В.Ю. Кольцов, Ю.М. Трубаков, И.Г. Тананаев // Дни науки–2018: XVIII Всероссийская научно-практическая конференция. 70 лет ФГУП «ПО «МАЯК»; Т. 1. Материалы конференции. – Озёрск: ОТИ НИЯУ МИФИ, 2018. – С. 36–39.
25. Отвалы Завитинского литиево-бериллиевого месторождения как сырье для получения лития / Ю.В. Азарова, В.В. Казанцев, В.Ю. Кольцов, Г.А. Сарычев, И.Г. Тананаев // Обогащение руд. – 2015. – № 2 (356). – С. 42–46. DOI: 10.17580/or.2015.02.09.
26. Быховский Л.З., Пикалова В.С. Минерально-сырьевая база редких металлов Северо-Запада России – основа создания центра редкометалльной промышленности страны // Разведка и охрана недр. – 2015. – № 1. – С. 3–7.
27. Смертина П. Литий берут в разработку: «Росатом» и «Норникель» займутся его добычей в Мурманской области // Коммерсантъ. – 2022. – № 73 (7274) от 26.04.2022 г. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5327599> (дата обращения: 15.05.2022).
28. Правила определения размера разовых платежей за пользование недрами на участках недр, которые предоставляются в пользование без проведения аукционов / Утв. Постановлением Правительства РФ от 28.12.2021 г. N 2498 // Собрание законодательства РФ, 03.01.2022, N 1 (Ч. III), Ст. 200.
29. Смертина П. «Росатом» аккумулирует литий: госкорпорация вложится в добычу металла для электромобилей // Коммерсантъ. – 2021. – № 132 (7094) от 29.07.2021 г. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4919729> (дата обращения: 15.05.2022).
30. Проект Постановления Правительства РФ «О порядке определения размера разовых платежей за пользование недрами на участках недр, которые предоставляются в пользование без проведения аукционов» (подготовлен Минприроды России, ID проекта 02/07/08-21/00119050).
31. Jaskula B.W. 2017 Minerals Yearbook. Lithium [advance release]. U.S. Geological Survey. 2020. P. 1–11. URL: [Lithium 2017 \(amazonaws.com\)](https://www.usgs.gov/media/factsheet/lithium-2017) (дата обращения: 15.05.2022).
32. Усова Т.Ю., Михеева Е.Д. Возможности расширения сырьевой базы лития за счет применения новых технологий переработки сырья // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2018. – № 1. – С. 73–79.
33. Перспективы использования промышленных рассолов Сибирской платформы для извлечения лития и брома / С.Л. Шварцев, С.В. Алексеев, А.Г. Вахромеев, Л.П. Алексеева // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – Т. 2. – № 1. – С. 30–34.
34. Литиеносные подземные воды Иркутской области и Западной Якутии / С.В. Алексеев, Л.П. Алексеева, А.Г. Вахромеев, Г.П. Шмаров // Горный журнал. – 2012. – № 2. – С. 8–13.
35. Поликомпонентные литиеносные рассолы Сибирской платформы – сырье многоцелевого назначения / А.Д. Рябцев, Н.П. Коцупало, А.Г. Вахромеев, М.Ф. Комин // Рациональное освоение недр. – 2013. – № 1. – С. 44–51.
36. Вахромеев А.Г. Месторождения промышленных поликомпонентных рассолов глубоких горизонтов гидроминеральной провинции Сибирской платформы // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 9 (92). – С. 73–78.
37. Геологические ресурсы поликомпонентных рассолов нефтегазодобывающих регионов с целью расширения ассортимента выпускаемой продукции / Л.Ф. Ушивцева, Ю.В. Белякова, П.В. Киргизов, М.В. Фадеев, О.А. Шарова, Е.Н. Лиманский, Я.Л.О. Алмамедов // Геология, география и глобальная энергия. – 2011. – № 4 (43). – С. 102–107.
38. Дроздов А.В. Горно-геологические и технологические проблемы при строительстве подземного рудника «Удачный» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 2. – С. 125–131.
39. Комплексная переработка минерализованных геотермальных вод / А.Ш. Рамазанов, М.А. Каспарова, И.В. Сараева, А.Б. Алхасов, О.М. Рамазанов // Экология и промышленность России. – 2016. – Т. 20. – № 2. – С. 14–17.
40. Попов Г.В. Изучение сорбции ионов лития из геотермальных растворов ионообменными смолами // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. – 2019. – № 1 (35). – С. 199–206.
41. Иркутская нефтяная компания. – 2021. URL: <https://irkutskoil.ru/press-center/minpromtorg-gazprom-ink-podpisali-dorozhnyuyu-kartu-po-dobyche-litiya-na-kovyktinskommestorozhdenii/> (дата обращения: 15.05.2022).
42. Михайлов Д.В., Добрынин Е.В. Перспективы использования пластовых промышленных вод и рассолов Ковыктинского месторождения в качестве гидроминерального сырья. – Иркутск: ООО «Газпром добыча Иркутск», 2021. – 21 с. URL: https://www.pprog.ru/upload/best_pr_2021/Irkutskaya%20область/Проект/3%20Михайлов_Добрынин_Презентац.pdf (дата обращения: 15.05.2022).
43. Bohsen M. Lithium extraction techniques – a look at the latest technologies and the companies involved. – 2016. URL: <https://seekingalpha.com/article/3988497-lithium-extraction-techniques-look-latest-technologies-companies-involved> (дата обращения: 15.05.2022).
44. Комплекс современных технологических решений переработки сподуменовых руд / А.В. Курков, С.И. Ануфриева, Е.Г. Лихникевич, А.А. Рогожин // Разведка и охрана недр. – 2018. – № 9. – С. 44–52.
45. Исследование обогащения забалансовой руды Завитинского литий-бериллиевого месторождения радиометрическими методами / И.Г. Балакина, А.В. Лаврентьев, Г.А. Сарычев, И.Г. Тананаев // Обогащение руд. – 2015. – № 6 (360). – С. 28–34. DOI: 10.17580/or.2015.06.06.
46. Recent developments in preconcentration using dense media separation / I. Grewal, M. Lundt, D. Wong, W. Tse. – 2016. URL: <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2016/05/Dense-Media-Separation.pdf> (дата обращения: 15.05.2022).
47. Liu Y.L., Liu J. The flotation process of lepidolite in Jiangxi province in China // Advanced Materials Research. – 2014. – V. 1033–1034. – P. 1309–1312. – Article number 108719. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1033-1034.1309.
48. Recycling lepidolite from tantalum-niobium mine tailings by a combined magnetic-flotation process using a novel gemini surfactant: from tailings dams to the «bling» raw material of lithium / Z. Huang, S. Zhang, C. Cheng, H. Wang, R. Liu, Y. Hu, G. He, X. Yu, W. Fu // ACS Sustainable Chemistry and Engineering. –

2020. – V. 8 (49). – P. 18206–18214. DOI: 10.1021/acssuschemeng.0c06609.
49. Lithium bioleaching from lepidolite using the yeast *Rhodotorula rubra* / R. Marcinčáková, J. Kaduková, A. Mražíková, O. Velgosošová, M. Vojtko // *Inżynieria Mineralna*. – 2015. – V. 16. – № 1. – P. 1–6.
50. Lithium extracting from zinnwaldite: economical comparison of an adapted spodumene and a direct-carbonation process / L. Rentsch, G. Martin, M. Bertau, M. Höck // *Chemical Engineering and Technology*. – 2018. – V. 41. – № 5. – P. 975–982. DOI 10.1002/ceat.201700604.
51. Попов Г.В. Выделение лития на сорбентах ТОКЕМ-160 и AMBERLITE IR-120 из водных растворов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 146–154. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/10/2862>.
52. Извлечение лития из жидких сред композиционными материалами на основе диоксидов титана и марганца / Л.Н. Рождественская, М.А. Третьяк, А.В. Пальчик, В.Н. Беляков // *Ученые записки Таврического национального университета. Серия: Биология и химия*. – 2013. – Т. 26 (65). – № 4. – С. 372–376.
53. Способ комплексной переработки попутных вод нефтяных месторождений: пат. RU 2189362 С2, 20.09.2002; № 2000116192/12 заявл. 19.06.2000.
54. Способ комплексной переработки попутных вод нефтяных месторождений: пат. RU 2724779 С1, № 2020100726; заявл. 14.01.2020, опубл. 25.06.2020.
55. Комплексная переработка литиеносных бромсодержащих высокоминерализованных рассолов / Н.П. Коцупало, А.Д. Рябцев, А.А. Кураков, Л.А. Серикова, Е.П. Гущина // *Известия Томского политехнического университета*. – 2004. – Т. 307. – № 7. – С. 70–76.

Поступила 27.07.2022 г.

Прошла рецензирование 21.09.2022 г.

Информация об авторах

Боярко Г.Ю., доктор экономических наук, кандидат геолого-минералогических наук, профессор, нефтегазовое отделение Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Хатьков В.Ю., начальник департамента, ПАО Газпром; соискатель нефтегазового отделения Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ткачева Е.В., инженер организационного отдела Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

UDC 553:661.834

LITHIUM RAW POTENTIAL IN RUSSIA

Grigory Yu. Boyarko¹,
gub@tpu.ru

Vitaly Yu. Khatkov^{1,2},
V.Khatkov@adm.gazprom.ru

Evganiya V. Tkacheva¹,
belayaev@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² PJSC «Gazprom»,
2, Pobedy square, St. Petersburg, 196143, Russia.

The relevance of the work is caused by the problems of Russia's total import dependence on lithium raw materials in the absence of national production of this critical raw material.

Purpose: to study lithium raw material base in Russia and the prospects of national production of its extraction.

Methods: content analysis of all information on the subject of the mineral resource base of lithium in Russia.

Results. Currently, the state of the Russian lithium production industry is characterized by the absence of national extraction of lithium raw materials and total import dependence on lithium carbonate. The steadily growing demand for lithium from battery manufacturers, which has caused an unprecedented increase in world prices for lithium products, creates favorable prerequisites for the activation of the domestic lithium industry. The reconstruction of the national production of strategic lithium raw materials for its import substitution is possible, first of all, by the commissioning of hydromineral deposits of underground brines in the infrastructures of existing oil and gas producing enterprises and other economic entities. The most promising pilot project is associated with lithium production at the Kovykta gas field in Eastern Siberia. The well-known prepared deposits of the traditional technological type of spodumene pegmatite's in Russia for a long time were unattractive in terms of morally and technically outdated technical and economic indicators, and only in the conditions of a sharp increase in prices for lithium products in 2021–2022, investors' interest in them resumed. In the conditions of high prices for lithium raw materials, projects for development of spodumene pegmatite deposits, primarily the Kolmozersky deposit in the Murmansk region, are also becoming attractive. It is necessary to reassess the well-known Russian spodumene pegmatite deposits near the developed industrial infrastructures, taking into account modern economic conditions and new technologies for processing lithium raw materials. New exploration work may lead to the discovery of new deposits of spodumene pegmatite, which is realized by the example of the search for Tasheglinskaya Square in the Kemerovo region.

Key words:

Lithium, strategic raw materials, import dependence, spodumene pegmatite, hydromineral deposits, projects.

The research was carried out using the funds of the grant of the Russian Science Foundation (project no. 22-28-01742).

REFERENCES

- Nicholson P. Past and future development of the market for lithium in the World aluminium industry. *Energy*, 1978, vol. 3, no. 3, pp. 243–246. DOI: 10.1016/0360-5442(78)90019-1.
- Ktalkherman M.G., Emelkin V.A., Pozdnyakov B.A. Production of lithium oxide by decomposition lithium carbonate in the flow of a heat carrier. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2009, vol. 43, no 1, pp. 88–93. DOI: 10.1134/S0040579509010114.
- Sheets J. New lithium market. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 2000, vol. 21, no. 5, pp. 97–99.
- Yang C.-H. Market game analysis between resource suppliers and downstream enterprises – based on lithium-base grease industry in China. *International Conference on Management Science and Engineering – 19th Annual Conference Proceedings*, 20–22 September 2012. Code 956522012, article number 64142642012, pp. 757–761. DOI: 10.1109/ICMSE.2012.6414264.
- Taylor D.R., Young R.I. *Lithium use in batteries: demand and supply considerations*. New York, Nova Science Publishers, Inc., 2013. 80 p.
- Zhou P., Tang J.-R., Zhng T. Supply and demand prospect of global lithium resources and some suggestions. *Geological Bulletin of China*, 2014, vol. 33, no. 10, pp. 1532–1538.
- Swart P., Dewulf J., Biernaux A. Resource demand for the production of different cathode materials for lithium ion batteries. *Journal of Cleaner Production*, 2014, vol. 84, no. 1, pp. 391–399. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.01.056.
- Sanders M. Lithium-ion battery raw material supply and demand 2016–2025. *Global Battery Raw Materials*. San Francisco, 19–20 June 2017. Code 139741, pp. 162–181.
- Bailey M.P. Lithium battery demand drives process evolution. *Chemical Engineering (United States)*, 2018, vol. 125, no. 4, pp. 14–19.
- Martin G., Rentsch L., Höck M., Bertau M. Lithium market research – global supply, future demand and price development. *Energy Storage Materials*, 2017, vol. 6, pp. 171–179. DOI: 10.1016/j.ensm.2016.11.004.
- Zhang B., Yan N., Li W. Power market bidding strategy for lithium battery energy storage based on energy distribution. *Dianli Jianshe/Electric Power Construction*, 2018, vol. 39, no 5, pp. 138–142. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2018.05.017.
- Liu D., Gao X., An H., Qi Y., Sun X., Wang Z., Chen Z., An F., Jia N. Supply and demand response trends of lithium resources driven by the demand of emerging renewable energy technologies in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, vol. 145, pp. 311–321. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.02.043.
- Liu D., Gao X., An H., Qi Y., Wang Z., Jia N., Chen Z. Exploring behavior changes of the lithium market in China: Toward technology-oriented future scenarios. *Resources Policy*, 2020, vol. 69, article no 101885. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101885.

14. Lyman V.K., Belousova E.B. World market of lithium raw materials and lithium compounds. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 2021, vol. 1–6, pp. 116–118. In Rus.
15. *Kontseptsiya po razvitiyu proizvodstva i ispolzovaniya elektricheskogo avtomobilnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda* [Concept for the development of production and use of electric motor transport in the Russian Federation for the period up to 2030]. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation from 08/28/2021, no 2290-r. Consolidated Statutes of the Russian Federation, no. 35 from 08/30/2021, article 6327.
16. Dessemond C., Lajoie-Leroux F., Soucy G., Laroche N., Magnan J.-F. Spodumene: the lithium market, resources and processes. *Minerals*, 2019, vol. 9, no 6, article no 334. DOI: 10.3390/min9060334.
17. Tolkushkina E.A., Torikova M.V., Komin M.F. Lithium mineral resources: development and use problems. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 2012, no. 2, pp. 2–9. In Rus.
18. Kremenetskiy A.A., Linde T.P., Yushko N.A., Shaderman F.I. *Mineralnoe syre. Litiy. Spravochnik* [Mineral raw materials. Lithium. Directory]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1999. 49 p.
19. Li H., Eksteen J., Kuang G. Recovery of lithium from mineral resources: state-of-the-art and perspectives – a review. *Hydrometallurgy*, 2019, vol. 189, article no. 105129. DOI: 10.1016/j.hydromet.2019.105129.
20. Plotnikova R.I., Lukyanchikov V.M. Industrial ground water resources and problems of their development. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 2010, vol. 5. pp. 2–7. In Rus.
21. Klyucharev D.S., Mikheeva E.D. On the grade of lithium and by-products in lithium-bearing industrial groundwaters of potentially perspective territories of Russia. *Prospect and protection of mineral resources*, 2020, vol. 4, pp. 53–60. In Rus.
22. Kabanov A.A., Akhmadshchin N.Yu. Tuganskoe mestorozhdenie – pervenets promyshlennoy razrabotki titantsirkonievyykh rossypay Rossii [Tuganskoe deposit is the first-born industrial development of titanium-zirconium placers in Russia]. *Gorny Zhurnal*, 2021, no. 10, pp. 54–64.
23. Golikov A.S. Zavitsinskoye mestorozhdenie [Zavitsinskoye deposit] *Zapiski Leningradskogo gornogo instituta*, 1953, vol. XXVIII, pp. 59–102.
24. Sarychev G.A., Koltsov V.Yu., Trubakov Yu.M., Tananaev I.G. Vossozdanie syrevoy bazy litiyovoy promyshlennosti v Rossiyskoy Federatsii [Reconstruction of the raw material base of the lithium industry in the Russian Federation]. *XVIII Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Dni nauki–2018. 70 let FGUP «PO «Mayak»; T. 1. Materialy konferentsii* [XVIII All-Russian scientific and practical conference. Days of Science–2018. 70 years of FSUE «PO «Mayak»]. Ozersk, OTI NIYAU MIFI Publ., 2018. Vol. 1, pp. 36–39.
25. Azarova Yu.V., Kazantsev V.V., Koltsov V.Yu., Sarychev G.A., Tananaev I.G. The Zavitsinskoye lithium-beryllium deposit dumps as raw material for lithium production. *Obogashchenie Rud*, 2015, vol. 2 (356), pp. 42–46. In Rus. DOI: 10.17580/or.2015.02.09.
26. Bykhovskiy L.Z., Pikalova V.S. Mineral resources of rare metals of the north-west of Russia – the basis of creation of the redkometallny center of the industry of the country. *Prospect and protection of mineral resources*, 2015, vol. 1, pp. 3–7. In Rus.
27. Smertina P. Litiy berut v razrabotku: «Rosatom» i «Normikel» zaymutsya ego dobychey v Murmanskoy oblasti [Lithium is being taken into development: Rosatom and Norilsk Nickel will be engaged in its production in the Murmansk region]. *Kommersant*, no. 73 (7274), 04/26/2022. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/5327599> (accessed 15 May 2022).
28. Pravila opredeleniya razmera razovykh platezhey za polzovanie nedrami na uchastkakh nedr, kotorye predostavlyayutsya v polzovanie bez provedeniya auktsionov [Rules for determining the amount of one-time payments for the use of subsurface resources in subsurface areas that are provided for use without auctions]. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation from 12/28/2021, no 2290-r. *Consolidated Statutes of the Russian Federation*, no. 1, 01/03/2022. P. III, article 200.
29. Smertina P. «Rosatom» akumuliruet litiy: goskorporatsiya vlozhit'sya v dobychu metalla dlya elektromobiley [Rosatom accumulates lithium: the state corporation will invest in the extraction of metal for electric vehicles]. *Kommersant*, no. 132 (7094), 07/29/2021. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/4919729>. (accessed 15 May 2022).
30. *O poryadke opredeleniya razmera razovykh platezhey za polzovanie nedrami na uchastkakh nedr, kotorye predostavlyayutsya v polzovanie bez provedeniya auktsionov* [On the procedure for determining the amount of one-time payments for the use of subsoil in subsoil plots that are provided for use without auctions]. Draft Decree of the Government of the Russian Federation. Prepared by the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, Project ID 02/07/08-21/00119050).
31. Jaskula B.W. 2017 Minerals Yearbook. Lithium [advance release]. *U.S. Geological Survey*, 2020, 11 p. Available at: [Lithium 2017 \(amazonaws.com\)](https://www.usgs.gov/energy/lithium) (accessed 15 May 2022).
32. Usova T.Yu., Mikheeva E.D. Possibilities for the lithium resource base expanding through the use of new technologies for raw materials processing diamond mining industry. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 2018, no. 1, pp. 73–79. In Rus.
33. Shvarcev S.L., Alekseev S.V., Vakhromeev A.G., Alekseeva L.P. Perspektivy ispolzovaniya promyshlennykh rassolov Sibirskoy platformy dlya izvlecheniya litiya i broma [Prospects of using industrial brines of the Siberian platform for lithium and bromine extraction]. *Interexpo Geo-Siberia*, 2012, vol. 2, no. 1, pp. 30–34.
34. Alekseev S.V., Alekseeva L.P., Vakhromeev A.G., Shmarov G.P. Lithium-bearing underground water at Irkutsk Region and the Western Yakutia territory. *Gornyi Zhurnal*, 2012, no. 2, pp. 8–13.
35. Ryabov A.D., Kotsupalo N.P., Vakhromeev A.G., Komin M.F. Polikomponentnye litienosnye rassoly Sibirskoy platformy – syre mnogotselovogo naznacheniya [Polycomponent lithium-bearing brines of the Siberian platform – multipurpose raw materials]. *Ratsionalnoe osvoenie nedr*, 2013, no. 1, pp. 44–51.
36. Vakhromeev A.G. Fields of industrial multicomponent brines of Siberian platform hydromineral province deep horizons. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2014, no. 9 (92), pp. 73–78. In Rus.
37. Ushivtseva L.F., Belyakova Yu.V., Kirgizov P.V., Fadeev M.V., Sharova O.A., Limansky E.N., Almamedov Ya.L.O. Geological resources of oil and gas producing regions of multicomponent brines in order to expand the product range. *Geology, geography and global energy*, 2011, no. 4 (43), pp. 102–107. In Rus.
38. Drozdov A.V. Mining-and-geological and engineering problems in construction of Udachny underground mine. *Mining informational and analytical bulletin*, 2015, no. 2, pp. 125–131. In Rus.
39. Ramazanov A.Sh., Kasparova M.A., Saraeva I.V., Alkhasov A.B., Ramazanov O.M. Comprehensive utilization of mineralized geothermal waters as a solution to environmental problem. *Ecology and industry of Russia*, 2016, vol. 20, no. 2, pp. 14–17. In Rus.
40. Popov G.V. Studying the sorption of lithium ions from geothermal solutions by ion-exchange resins. *Bulletin of the Tver State University. Series: Chemistry*, 2019, vol. (35), pp. 199–206. In Rus.
41. *Irkutskaya neftyanaya kompaniya* [Irkutsk Oil Company]. 2021. Available at: <https://irkutskoil.ru/press-center/minpromtorg-gazprom-ink-podpisali-dorozhnyu-kartu-po-dobyche-litiya-na-kovyktinskom-mestorozhdenii/> (accessed 15 May 2022).
42. Mikhailov D.V., Dobrynin E.V. *Perspektivy ispolzovaniya plastovykh promyshlennykh vod i rassolov Kovyktinskogo mestorozhdeniya v kachestve gidromineralnogo syrva* [Prospects for using reservoir industrial waters and brines of the Kovykta deposit as hydromineral raw materials]. Irkutsk, Gazprom Dobycha Irkutsk LLC, 2021. 21 p. available at: https://www.pprog.ru/upload/best_pr_2021/Иркутская%20область/Проект/3%20Михайлов_Добрынин_Презентация.pdf (accessed 15 May 2022).
43. Bohsen M. *Lithium extraction techniques – a look at the latest technologies and the companies involved*. 2016. Available at: <https://seekingalpha.com/article/3988497-lithium-extraction-techniques-look-latest-technologies-companies-involved> (accessed 15 May 2022).
44. Kurkov A.V., Anufrieva S.I., Likhnikovich E.G., Rogozhin A.A. Complex of modern technological solutions for spodumene ore processing. *Prospect and protection of mineral resources*, 2018, no. 9, pp. 44–52. In Rus.
45. Balakina I.G., Lavrentev A.V., Sarychev G.A., Tananaev I.G. *Issledovanie obogashcheniya zabalansovoy rudy Zavitsinskogo litiy-berillievogo mestorozhdeniya radiometricheskimi metodami* [The Zavitsinskoye deposit lithium-beryllium cut-off grade ore radiometric beneficiation study]. *Obogashchenie Rud*, 2015, vol. 6 (360), pp. 28–34. DOI: 10.17580/or.2015.06.06.

46. Grewal I., Lundt M., Wong D., Tse W. *Recent developments in preconcentration using dense media separation*. 2016. Available at: <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2016/05/Dense-Media-Separation.pdf> (accessed 15 May 2022).
47. Liu Y.L., Liu J. The flotation process of lepidolite in Jiangxi province in China. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1033–1034, pp. 1309–1312, article no. 108719. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1033-1034.1309.
48. Huang Z., Zhang S., Cheng C., Wang H., Liu R., Hu Y., He G., Yu X., Fu W. Recycling lepidolite from tantalum-niobium mine tailings by a combined magnetic-flotation process using a novel gemini surfactant: from tailings dams to the «bling» raw material of lithium. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2020, vol. 8 (49), pp. 18206–18214. DOI: 10.1021/acssuschemeng.0c06609.
49. Marcinčáková R., Kaduková J., Mražiková A., Velgosová O., Vojtko M. Lithium bioleaching from lepidolite using the yeast *Rhodotorula rubra*. *Inżynieria Mineralna*, 2015, vol. 16, no. 1, pp. 1–6.
50. Rentsch L., Martin G., Bertau M., Höck M. Lithium extracting from zinnwaldite: Economical comparison of an adapted spodumene and a direct-carbonation process. *Chemical Engineering and Technology*, 2018, vol. 41, no. 5, pp. 975–982. DOI: 10.1002/ceat.201700604.
51. Popov G.V. Lithium excreting on sorbents TOKEM-160 and AMBERLITEIR-120 from aqueous solutions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 146–154. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/10/2862>.
52. Rozhdestvenskaya L.N., Tretyak M.A., Palchik A.V., Belyakov V.N. Izvlechenie litiya iz zhidkikh sred kompozitsionnymi materialami na osnove dioksidov titana i margantsa [Lithium extraction from liquid media by composite materials based on titanium and manganese dioxides]. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, 2013, vol. 26 (65), no. 4, pp. 372–376.
53. Litvinenko V.I., Varfolomeev B.G. *Sposob kompleksnoy pererabotki poputnykh vod neftyanykh mestorozhdeniy* [Method of complex processing of associated waters of oil fields]. Patent RF no. 2189362 C2, 2002.
54. Sakhabutdinov R.Z., Gubaydulin F.R., Kudryashova L.V., Garifullin R.M., Zvezdin E.Yu., Buslaev E.S. *Sposob kompleksnoy pererabotki poputnykh vod neftyanykh mestorozhdeniy* [Method of complex processing of associated waters of oil fields]. Patent RF no. 2724779 C1, 2020.
55. Kotsupalo N.P., Ryabtsev A.D., Kurakov A.A., Serikova L.A., Gushchina E.P. Complex processing of lithium-bearing bromine-containing highly mineralized brines]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2004, vol. 307, no. 7, pp. 70–76. In Rus.

Received: 27 July 2022.

Reviewed: 21 September 2022.

Information about the authors

Grigory Yu. Boyarko, Dr. Sc., Cand. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vitaly Yu. Khatkov, head of the department, Gazprom PJSC; post graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Evgeniya V. Tkacheva, engineer National Research Tomsk Polytechnic University.