

Ю. Б. МИРОНОВ, А. М. КАРПУНИН, В. З. ФУКС (ВСЕГЕИ)

Эпохи формирования и типы месторождений лития зарубежных стран

Рассмотрены эпохи литиевого рудогенеза и экономические аспекты – запасы, ресурсы и рынок лития. Сделаны выводы по состоянию минерально-сырьевой базы мира и задачам геологической службы России. Расширение масштабов использования лития в различных отраслях экономики обуславливает необходимость возобновления работ по оценке минерально-сырьевой базы лития в России.

Ключевые слова: литий, мировой рынок, запасы и ресурсы, сподуменовые пегматиты, гидроминеральное сырье, задачи России.

YU. B. MIRONOV, A. M. KARPUNIN, V. Z. FUKS (VSEGEI)

Ages of formation and types of lithium deposits in foreign countries

The epochs of lithium ore genesis and economic aspects are considered – reserves, resources and the market of lithium. Conclusions are drawn on the state of the mineral resource base of the world and the tasks of the geological service of Russia. The expansion of the use of lithium in various sectors of the economy necessitates the resumption of work on the assessment of the mineral resource base of lithium in Russia.

Keywords: lithium, world market, reserves and resources, spodumene pegmatites, hydromineral raw materials, tasks of Russia.

Для цитирования: Миронов Ю. Б. Эпохи формирования и типы месторождений лития зарубежных стран / Ю. Б. Миронов, А. М. Карпунин, В. З. Фукс // Региональная геология и металлогения. – 2022. – № 92. – С. 105–116. DOI: 10.52349/0869-7892_2022_92_105-116

Введение. За последние годы литий стал одним из наиболее востребованных в мире военными и гражданскими отраслями промышленности редких металлов. Это очень важный для инновационной экономики вид минерального сырья, использование которого в мире постоянно увеличивается вместе с развитием ряда современных отраслей промышленности [5; 6].

Цены на карбонат лития стремительно растут: с 13 тыс. долл. за 1 т в июле 2021 г. до 75 тыс. долл. в апреле 2022 г. Это вызывает ажиотаж и дефицит – по данным *Benchmark Mineral Intelligence* запасы карбоната лития у производителей аккумуляторов находятся на низком или нулевом уровне. Из-за высокого спроса на производство аккумуляторов для электромобилей текущие темпы добычи лития недостаточны. По оценке *Global Data* к 2024 г. спрос на него увеличится в 2,5 раза, а прогноз Международного энергетического агентства говорит о том, что к 2040 г. востребованность лития на рынке вырастет в 40 раз [18].

Развитие литиевой промышленности требует наращивания добычи этого вида стратегического сырья. Крупнейшие добывающие компании приступили к масштабным поискам новых место-

рождений, а также усилили внимание к разработке новых технологий извлечения лития.

Формирование месторождений лития связано как с эндогенными, так и с экзогенными процессами рудогенеза. Геолого-промышленные типы месторождений лития в эндогенном спектре приурочены главным образом к кислым породам (внутрикоровые граниты), при этом сосредоточение эндогенных запасов имеет место в редкометалльных пегматитах; основная масса экзогенных мировых запасов связана с природными высокоминерализованными водами [8].

Многолетний мировой опыт добычи лития из природных объектов дал возможность геологам распределить его месторождения по двум основным группам. С одной стороны, это магматические горные породы, с другой – гидроминеральные источники или, так называемые, салары. Последние представляют собой бессточные понижения земной поверхности, заполненные отложениями солей (Salars – исп. «солить»), применительно к литию – рапа бессточных соленых озер с содержанием 0,06–0,5 % Li₂O. Они особенно распространены на отдельных территориях Чили, Аргентины и КНР, представляя собой,

по существу, гидроминеральные месторождения лития.

Типы месторождений лития. Месторождения, относящиеся к категории промышленных в рамках этих групп (рис. 1), включают четыре типа: 1) пегматитовый, 2) гранитный, 3) кальдерный, 4) селарный [6; 7]. Наряду с этим в качестве перспективного источника лития также рассматриваются геотермальные воды геодинамически активных областей и подземные воды нефтяных полей. Последние два типа месторождений по агрегатному состоянию и химическому составу литийсодержащего сырья аналогичны селарам, но по средним содержаниям они редко достигают уровня самых бедных рассолов. Поэтому изучение таких объектов литийносных минеральных вод к настоящему времени не продвинулось дальше экспериментальных полупромышленных испытаний извлечения лития. Результаты этих испытаний не подтверждают рентабельность производства и поэтому пока не используется для промышленной добычи лития и не могут быть отнесен к разряду промышленных объектов.

Практический интерес геологоразведочных компаний к месторождениям лития вызывают, как правило, те из них, ресурсная оценка которых (включая прошлую добычу, если она была) составляет не менее 0,1 млн т Li_2O . Нижний лимит минимального среднего содержания при этом принимается 0,4 % Li_2O [2; 8].

Пегматитовый тип вмещают плюмазитовые двуслюдяные и/или мусковитовые граниты и лейкограниты. Пегматиты зачастую оторваны от материнских гранитов и локализованы в метаспорах любого состава, измененных на уровне не ниже верхней части зеленосланцевой фации. Рудные скопления проявлены в виде жилкообразных и дайкообразных тел редкометалльных пегматитов, иногда одиночных, но обычно в составе групп, эшелонированных по простиранию и падению. Минеральные типы и подтипы включают комплексный (микроклин-альбит-сподуменовый, микроклин-альбит-петалитовый, микроклин-альбит-лепидолитовый подтипы) и альбит-сподуменовый. Концентраторы лития – сподумен, петалит, лепидолит, амблигонит, эвкрипит, циннвальдит, литиевый мусковит. В ассоциацию с литием могут входить Ta, Sn, Be, Cs, Rb, Nb.

Проведенный анализ геодинамических условий формирования крупных полей сподуменовых пегматитов с литиевыми и комплексными (Li, Cs, Ta, Be, Sn) рудами редких металлов в пределах Центрально-Азиатского складчатого пояса позволил отечественным специалистам установить хронологические закономерности их генезиса [3]. Для большинства изученных полей выявлен существенный временной разрыв (от первых десятков до сотен миллионов лет) между сподуменовыми пегматитами и обычно считающимися материнскими гранитами, с которыми они пространственно ассоциируют, что дает основание выделять самостоятельный

пегматитовый этап в истории магматизма ряда пегматитовых структур Центральной Азии. Во временном интервале от докембрия до позднего мезозоя установлена тесная связь крупных полей слюдоносных пегматитов с обстановками растяжения континентальной литосферы, которые проявляются либо в виде зон долгоживущих глубинных разломов, ограничивающих троговые (рифтогенные) структуры, испытывавшие процессы тектономагматической активизации, либо в виде постколлизийных зон сдвиго-раздвиговых деформаций. Образованию редкометалльных пегматитов в значительной мере способствует наличие достаточно мощной зрелой коры, рассеиваемой глубинными (вплоть до верхней мантии) длительно действующими разломами – проводниками энергии и вещества из глубинных источников.

Гранитный тип связан с плюмазитовыми Li-F редкометалльными гранитами. Рудные тела представляют собой грейзенизированные верхние части штокообразных, куполовидных или плитообразных массивов Li-F гранитов и их надынтривные грейзены. Концентраторы лития – лепидолит, циннвальдит, сподумен, амблигонит, литиевый мусковит. В ассоциацию с литием могут входить флюорит, Sn, Be, Ta, Cs, Rb, Nb, W.

Кальдерный тип. В состав магматических пород, вмещающих кальдеры, могут входить в различном соотношении субвулканические тела, лавы и туфы разных составов от трахитов до онгонитов, реже – андезиты и базиты. Минерализованные слои или пластообразные зоны в породах, формировавшихся в крупных субаэральных кальдерах, включают осадки внутрикальдерных озер; вмещающие туфоалевролиты, туффизитовые брекчии, туфы, туффиты, боратоносные слои, песчаники (углеродистый, пепловый, глинистый, ядаритовый подтипы). Концентраторы лития – литийносные монтмориллонит, иллит, ядарит (минерал лития, недавно открытый в Сербии) [4; 12], вулканический пепел, гекторит, углеродистое вещество, лепидолит, литиевый мусковит. В ассоциации с литием находятся бор и калий.

Следует иметь в виду, что в перечисленных типах месторождений лития на конкретных объектах может индивидуально производиться отработка отдельных минералов лития, которые сами по себе, в том числе без учета других минералов лития и других редких металлов, могут определять практическую ценность месторождений. К ним относятся: в пегматитовом типе – сподумен, петалит, лепидолит; в гранитном – лепидолит, циннвальдит, сподумен, амблигонит; в кальдерном – литийносные монтмориллонит и иллит, ядарит, вулканический пепел (А. В. Ткачев, Д. В. Рундквист, Н. А. Вишневская, 2020) [8].

Селарный тип. Месторождения в селарах содержат не менее 2/3 мировых запасов и с разной степенью детальности оцененных ресурсов лития. Однако, в силу своего агрегатного состояния, они не имеют промышленного значения вне современного геологического периода, а досто-

верные данные для реальной оценки возможной роли саларов в геохимическом кругообороте лития в прошлые эпохи (древнее неогена) отсутствуют. Практически все регионы распространения литиеносных саларов, имеющие вполне определенную геодинамическую обстановку, установлены, а все их запасы и сопоставимые по качественным характеристикам ресурсы уже оценены и не имеют перспектив значительного роста в обозримом будущем (Christmann et al., 2015) [15]. В то же время сведения по основной части прироста и добычи, а также новой сырьевой базе в мире в последнее десятилетие получены именно на твердофазных месторождениях лития. Более того, рудные месторождения и салары в течение последних лет поменялись местами по извлечению лития: на рубеже XX и XXI вв. салары обеспечивали около 2/3 мирового потребления, а сейчас эта доля уменьшилась вдвое. Данная тенденция, судя по постоянно увеличивающемуся объему ведущихся геологоразведочных проектов на рудных объектах, будет только усиливаться.

В настоящее время за рубежом до 60–70 % лития производится за счет эксплуатации рапы бессточных соляных озер с содержаниями 0,06–0,5 % Li_2O (гидроминеральный источник).

В Чили литий добывается из рапы двух озер на Салар-де-Атакама (Salar de Atacama) в Андах. Концентрированные рассолы транспортируются в Антофагасту, на побережье Чили, и перерабатываются на двух заводах в карбонат лития: на одном заводе производится металлический литий, а на другом – гидроксид лития. Литий добывают и в других странах. Так, в Аргентине, в Андах карбонат лития и хлорид лития также получают из рассолов – Salar del Hambre Muerto. Следует отметить, что большая доля карбоната лития, произведенного в Южной Америке, экспортируется в Соединенные Штаты. Австралия является ведущим производителем литиевых минеральных концентратов. Бразилия, Китай, Португалия и Зимбабве также производят значительное количество этих концентратов, большинство которых используется непосредственно в производстве керамики и стекла. При этом Китай – единственная страна, которая производит большое количество карбоната лития и гидроксида лития из минеральных концентратов, главным образом из сподумена, импортируемого из Австралии. Кроме того, в Китае карбонат лития получают из рассолов соленого озера Забаю (Zabayu) в Тибетском автономном районе Синцзяна, также из солей озера Дунтай (Dongtai) и Соляного озера Ситаи-Хиньяер (Xitai Jinaier Salt Lake) в провинции Цинхай [17; 18].

Спрос на литий продолжит расти по мере того, как транспортные средства будут становиться более «зелеными», а электричество – экологичным. Это подтвердили аналитики одного из крупнейших в мире инвестиционных банков Goldman Sachs в декабре 2021 г., заявив, что литий («новый бензин») – это выгодный товар, кото-

рый легко хранить и который станет «ключевым фактором революции в электромобилестроении». В настоящее время мировые продажи литиевых солей составляют около 1 млрд долл. за 1 год – этот элемент стал важнейшим компонентом литий-ионных батарей, которые теперь питают все: от электромобилей до электроинструментов и смартфонов. По прогнозам в течение следующих 8 лет спрос на литий вырастет более чем на 300 %, потому, в частности, что все крупные электротехнические компании расширяют мощности по производству солнечной энергии, для хранения которой требуются литий-ионные батареи с высокой плотностью энергии. Например, Duke Energy недавно остановила работы по строительству атомной электростанции во Флориде и вместо этого планирует инвестировать в солнечную энергетику и аккумуляторы 6 млрд долл. Растущий спрос на аккумуляторные батареи и необходимость хранения энергии с высокой плотностью создают серьезную зависимость многих отраслей мировой промышленности от лития, что в свою очередь вызывает глобальный поиск новых литиевых источников [4].

Наиболее репрезентативная сводка размещения значимых месторождений лития охарактеризованных выше типов (за исключением саларного) выполнена специалистами Государственного геологического музея им. В. И. Вернадского (ГГМ РАН) [8] и представлена на рис. 1. Кроме указания местоположения месторождений лития в легенде оговорены эпохи литиевого рудогенеза с указанием возраста (млн или млрд лет) каждого рудного объекта, а также спектр сопутствующих ценных компонентов в рудах.

Эпохи литиевого рудогенеза в границах суперконтинентальных циклов Земли. Месторождения лития мира, приведенные на рис. 1, сопровождаются сведениями об их приуроченности к одному из суперконтинентальных циклов (эпохам, определяемым циклами Уилсона в ходе эволюции земной коры, приводящими к созданию предполагаемых новых суперконтинентов – Кенорания, Колумбия, Родиния, Пангея) в рамках концепции тектоники плит [8].

Основой для анализа послужила выборка литиевых месторождений мира (71 объект), в которых сосредоточены практически все промышленно значимые или потенциально экономически интересные ресурсы лития. Установлено, что они формировались в разные геологические эпохи от позднего мезоархея до голоцена. Распределение их ресурсов на шкале геологического времени имеет ярко выраженный дискретный характер. В кенорский, колумбийский, родинийский суперконтинентальные циклы формировались только пегматитовые месторождения лития. В пангейском цикле основные ресурсы также связаны с пегматитовыми месторождениями, но часть из них локализована в литий-фтористых редкометалльных гранитах. В незавершенном амазийском цикле главную роль в ресурсной

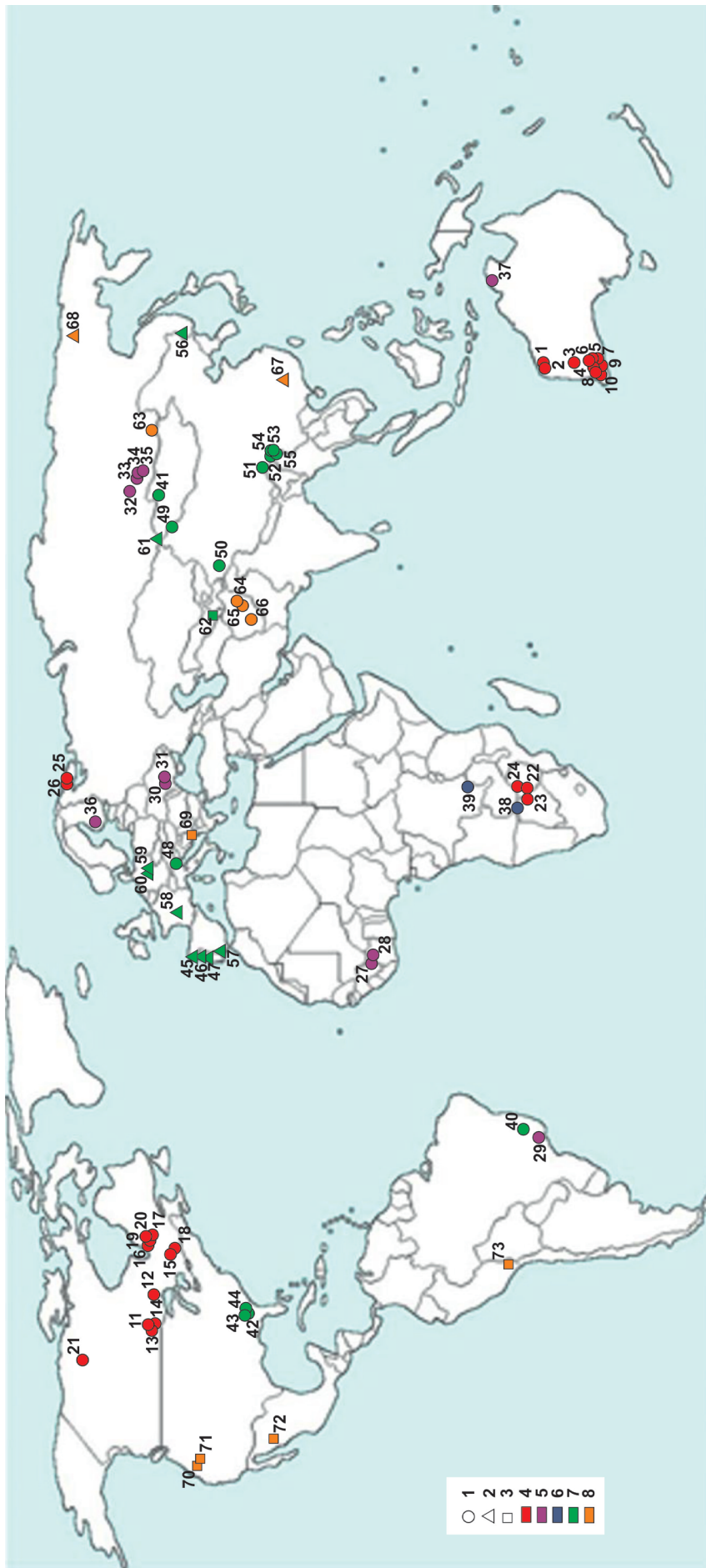


Рис. 1. Размещение месторождений лития мира [8]

1–3 – типы месторождений: 1 – пематитовый, 2 – гранитный, 3 – кальдерный; 4–8 – суперконтинентальные циклы: 4 – кенорский, 5 – колумбийский, 6 – родинийский, 7 – пангейский, 8 – амазийский. **Месторождения (полезные ископаемые в руде/возраст, млрд лет) (цифры на карте):** 1 – Пиллангура (Li, Ta, Sn, Be/2,88); 2 – Волжина (Li, Ta, Sn, Be/2,87); 3 – Кэтлин-Валли (Li, Ta, Sn/2,64); 4 – Маунт-Мэрион (Li/2,64); 5 – Болд-Хилл (Li, Ta, Sn/2,63); 6 – Кейд (Li, Ta/2,64); 7 – Анна (Li, Ta/2,64); 8 – Эрд-Фрей (Li/2,63); 9 – Маунт-Кэтлин (Li, Ta, Be/2,63); 10 – Гринбушес (Li, Ta, Sn, Nb/2,53); 11 – Пакеама-Лейк (Li, Ta, Cs, Rb/2,67); 12 – Нама-Крик (Li/2,65); 13 – Танко (Li, Ta, Cs, Be, Sn/2,64); 14 – Сепарейшн-Рэпидз (Li, Rb, Ta, Cs/2,64); 15 – Отые (Li/2,65); 16 – Лакорн (Li/2,64); 17 – Моблан (Li/2,62); 18 – Джеймс-Бэй (Li/2,62); 19 – Роуз (Li, Ta, Rb, Cs, Be/2,62); 20 – Вабуши (Li, Be/2,58); 21 – Йеллоунайф-Большо (Li/2,59); 22 – Бикита (Li, Cs, Be, Ta, Sn/2,62); 23 – Зулу (Li, Ta/2,61); 24 – Аркадия (Li, Ta/2,59); 25 – Колмозерское (Li, Ta, Be/2,52); 26 – Полмостундровское (Li, Ta, Be/2,52); 27 – Гуламина (Li/2,08); 28 – Бугуни (Li/2,08); 29 – Вольга-Гранде (Ta, Li, Sn/2,03); 30 – Надия – Станковатское (Li, Ta, Be/2,03); 31 – Полоховское (Li, Sn, Ta, Rb, Be/2,03); 32 – Вишняковское (Ta, Li, Sn, Be, Cs, Sn, Be/1,83); 33 – Гольцовое (Li, Ta, Cs, Sn, Be/1,83); 34 – Белореченское (Li, Ta, Sn, Be/1,83); 35 – Урикское (Li, Ta, Sn, Be/1,83); 36 – Рапасаарет – Оутувеси (Li/1,79); 37 – Обсервейшн-Хилл (Li, Ta, Sn/1,73); 38 – Камативи (Sn, Li, Ta, Be/1,04); 39 – МаноноКитололо (Li, Ta, Sn/0,95); 40 – (Li, Ta, Sn/0,51); 41 – Тасыгское (Li, Ta, Be, Sn, Nb/0,49); 42 – Кингз-Маунтин (Li, Sn, Ta, Be/0,36); 43 – Холлман-Бим (Li, Sn, Ta, Be/0,36); 44 – Линкольтон (Li, Sn, Ta, Be/0,36); 45 – Альберта (Ta, Li, Sn/0,31); 46 – Сепела (Li, Sn/0,31); 47 – Барросу (Li/0,24); 48 – Вайнебене (Li/0,24); 49 – Коктогай (Li, Be, Ta, Cs/0,22); 50 – Байлуншань (Li, Rb, Ta, Sn, Be/0,22); 51 – Чжаулун (Li/0,20); 52 – Елунгоу (Li, Ta, Be, Sn, Ta/0,20); 53 – Лицзягоу (Li, Be, Sn, Ta/0,20); 54 – Данба (Li, Ta/0,20); 55 – Цзяцзика (Li, Be, Ta/0,22); 56 – Вознесенское (F, Li, Be, Ta/0,46); 57 – Сан-Хосе-де-Вальдефлорес (Li, Sn, W/0,30); 58 – Эшассьер (Li, Ta, Sn, Be, W/0,33); 59 – Садислорф (Li, Sn, W/0,33); 60 – Циновец – Циннвальд (Li, Sn, W/0,33); 61 – Алахинское (Li, Ta/0,20); 62 – Шавазсай (Li/0,26); 63 – Завитинское (Li, Ta, Be/0,13); 64 – Парун (Li, Ta, Be/0,03); 65 – Шамакат (Li/0,03); 66 – Тагавлор (Li, Ta/0,03); 67 – Ичунь (Li, Ta, Rb, Cs/0,16); 68 – Кестер (Li, Sn, Rb, Cs/0,14); 69 – Ядар (Li, V/0,02); 70 – Кингс-Валли-Саут (Li, K/0,015); 71 – Такер-Пасс (Li, K/0,015); 72 – Лавентана-Эльсаус (Li, K/0,02); 73 – Фальчани (Li/0,015)

базе играют салары геодинамически активных областей при многократно меньшем значении эпитегрмальных стратиформных залежей, пегматитов и литий-фтористых гранитов. Ниже кратко рассматривается металлогеническое («литиевое») содержание указанных циклов.

Кенорский цикл охватывает значительную часть архея. В нем преобладают месторождения пегматитового типа. Самые ранние по возрасту – альбит-сподуменовые редкометалльные пегматиты комплекса Древних Гнейсов Свазиленда и гранит-зеленокаменного пояса Барбертон кратона Каапваль. Они отличаются малой продуктивностью. Пегматиты с рудами промышленного уровня появились позже, уже в конце мезоархея. Они представлены объектами кратона Палабора – Пилгангура и Воджина.

Неоархейские месторождения лития более многочисленны, чем мезоархейские, а география распространения гораздо шире. Наибольшее их количество выявлено в гранит-зеленокаменно-сланцевых поясах кратонов Йилгарн (Гринбушес, Эрл-Грей, Маунт-Марион и др.) и Сьюпериор (Танко, Лакорн, Джеймс-Бэй и др.). Также они установлены в аналогичных по природе поясах на кратонах Слейв (Йеллоунайф-Большо), Зимбабве (Бикита, Аркадия, Зулу) и Кольском (Колмозерское, Полмостундровское).

Основным рудным минералом является сподумен, но в промышленных рудах могут преобладать и другие минералы лития: амблигонит (Танко, Бикита), лепидолит (Бикита), петалит (Бикита, Зулу, Аркадия), эвкриптит (Бикита). Месторождение Сепарейшн-Рэпидз – редкий пример месторождения лития, в котором сподумен не предполагается извлекать в отдельный концентрат: только петалит и, вероятно, лепидолит.

В целом в период кенорского цикла возникло наибольшее количество месторождений исключительно пегматитового типа геолого-промышленного уровня. Месторождения кенорского цикла решающим образом способствовали увеличению объемов добычи литиевого сырья: в последние годы более половины лития извлекается из пегматитовых руд кратонов Палабора и Йилгарн, а в совокупности с залежами кратонов Сьюпериор и Зимбабве это значение приближается к 2/3 извлекаемых запасов.

Колумбийский цикл охватывает значительную часть протерозоя и также представлен только пегматитовым типом. Его представители с преобладанием сподумена в рудах известны в складчатых поясах среднего палеопротерозоя Риу-дас-Мортес (Вольта-Гранде), Эбурнейском (Гуламина, Бугуни) и Кировоградском (Полоховское, Надия Станковатское), а также в поясах Восточно-Саянском (Гольцовое, Вишняковское и др.), Свекофеннском (Рапасарет-Оутовеси) и Пайн-Крик позднего палеопротерозоя.

На месторождениях Украинского щита практическое значение имеет петалит. Из рудных объектов цикла эксплуатируются руды только на Вольта-Гранде, на остальных проводится развед-

очное бурение (месторождения в орогенных поясах Эбурнейский, Свекофеннский и Пайн-Крик).

Родинийский цикл также заключен в рамках протерозоя, не отличаясь от двух предыдущих по типам месторождений лития. В его границах выявлены два объекта пегматитового типа в гренвиллидах юга Центральной Африки: Манон-Китотоло в Кибарском поясе и Камативи в активизированном в конце мезопротерозоя кристаллическом массиве Дете-Камативи. В месторождениях цикла основной практический интерес представляет сподумен.

Пангейский цикл охватывает палеозой и низы мезозоя и, в отличие от предыдущих циклов, представлен всеми перечисленными выше типами. В нем преобладают пегматитовые объекты, наиболее значительные из которых установлены в Аппалачском поясе (Кингс-Маунтин и др.) и поясе Сонпань-Ганьцзы, включая его северо-западное продолжение в Кунь-Луэ (Цзяцзика, Байлуншань и др.) (рис. 1). Кроме того, они известны в орогенных поясах: Арасуай (Такуарал), Иберийском сегменте Герцинского (Сепеда и др.), Алтайском (Коктогай), и Тува-Монгольском (Тастыгское) сегментах Урало-Монгольского (Центрально-Азиатского) и палеозоидов Альпийского (Вайнебене). Только в Сепеда главный концентратор лития – петалит, в остальных – сподумен, в Коктогае заметная роль принадлежит лепидолиту.

В этом цикле впервые Li-F редкометалльные граниты и связанные с ними грейзены представляют геолого-промышленные типы лития. Цикл включает шесть месторождений литиеносных руд: Вознесенское и Алахинское в Урало-Монгольском орогенном поясе (в Дальневосточном и Алтайском сегментах соответственно), Сан-Хосе, Эшассьер, Циновец-Циннвальд и Садисдорф – в разных сегментах герцинского орогенного пояса Западной и Центральной Европы (рис. 1).

Месторождение кальдерного типа Шавазсай, локализованное в Тянь-Шаньском поясе в краевой части Чилтенской палеокальдеры, не имеет сколько-нибудь значимого веса в ресурсах лития, образованных в пангейском цикле (рис. 1). На месторождении все породы имеют повышенный геохимический фон лития, но его промышленно интересные концентрации оконтурированы только в метасоматизированных туфоалевролитах с повышенным содержанием углеродистого вещества, кремнезема и карбонатов, а также в телах флюидизитовых агломератовых брекчий [4].

В целом пангейский цикл – второй по количеству оцененных ресурсов после кенорского, он уступает ему, а также родинийскому циклу в средних содержаниях полезного компонента. Месторождения цикла в поясах Арасуай (Бразилия) и Аппалачском (США) характеризуются относительно скромными ресурсами. Более существенны масштабы добычи в пегматитовых месторождениях пояса Сонпань-Ганьцзы, где находится

крупнейший производитель сподуменового концентрата КНР рудник Цзяцзика.

Амазийский цикл ведет свое начало с мезозоя и представлен саларным и кальдерным типами месторождений лития.

Все месторождения и проявления кальдерного типа имеют значительное сходство в условиях залегания руд: краевые зоны субэвральных вулканических кальдер, наличие богатых литием пород онгонитового типа, включая их туфогенные и туфогенно-осадочные разности, и стратоидная морфология рудных тел. Однако они имеют и некоторые различия, позволяющие разделить их на четыре малочисленных подтипа. Первый представлен месторождением Шавазсай пангейского цикла. Оно единственное связано с постколлизийным, а не с синаккреционным магматизмом, и имеет специфический состав руд как по концентраторам лития, так и по природе вмещающего субстрата, из-за которого подтип можно назвать углеродистым.

Все пять объектов рассматриваемого типа, возникшие в амазийском цикле, выявлены в миоценовых палеокальдерах надсубдукционных окраинно-континентальных поясов. На севере провинции Бассейнов и Хребтов в кальдере Мак-Дермитт оценены месторождения Такер-Пасс и Кингс-Вэлли-Саут (рис. 1), а также обнаружены два перспективных участка. Известно еще несколько подобных проявлений в данной провинции, но значительные ресурсы оценены только в самой южной ее части на месторождении Лавентана-Эльсаус. Все положительно оцененные объекты провинции объединяет локализация их в туфогенных глинах, накопившихся в перикальдерных озерах, а также связь лития с глинистыми минералами типа иллита и монтмориллонита, и в гораздо меньшей степени — с гекторитом, слюдами и слабо измененными пепловыми частицами. Этот подтип логично назвать глинистым.

В Андийском поясе в последнее время завершена предварительная оценка месторождения Фальчани, связанного со слоями пепловых туфов, которые практически не изменены ни эпитемальными, ни гипергенными процессами. Весь литий сосредоточен в вулканическом стекле пепловых частиц, что предопределяет название подтипа — пепловый. В Балканском орогенном поясе в межгорной депрессии Ядар выявлено одноименное месторождение среди озерных вулканогенно-осадочных пород. Литий в рудах сконцентрирован в ядарите — боросиликате, который и был здесь открыт при осуществлении проекта, изначально ориентированного на оценку боратовой минерализации. Литиевые руды залегают в туфогенных песчаниках и алевролитах, переслаивающихся со слоями боратов.

Генезис месторождений кальдерного типа пока еще слабо изучен. На данный момент наиболее аргументированная модель основана на результатах геолого-структурного, минералогического, геохимического и геохронологического изуче-

ния месторождения Такер-Пасс в палеокальдере Мак-Дермитт. Здесь литиевая минерализация возникла в туфогенно-осадочных породах в период их литификации на стадии раннего диагенеза в процессе внутрислойной циркуляции термальных растворов, возникших при смешении постмагматических и метеорных вод. Эта модель не противоречит геологическим данным, известным для месторождений всех других подтипов кальдерного типа, кроме пеплового. Последний, очевидно, возник при прямом накоплении литиеносных пепловых туфов после вулканических извержений.

Значимые пегматитовые месторождения лития в амазийском цикле также известны, но только в двух металлогенических поясах (рис. 1): Забайкальском (Завитинское) и Гиндукушском (Парун и др.). Главный концентратор лития в них — сподумен. Среди всех циклов именно в амазийском доля объектов данного типа в ресурсном потенциале минимальна. Наименьший вклад в ресурсный потенциал лития в амазийском цикле внес гранитный тип. Хотя их проявления в мезозое-кайнозое многочисленны и географически распространены очень широко, но количественным лимитам для литиевого оруденения, установленным в данном исследовании, среди них отвечают только два объекта, образовавшихся в период от поздней юры до раннего мела: крупнейшее в мире месторождение лепидолитовых руд Ичунь в Южно-Китайском поясе и крупное месторождение амблигонитовых (с лепидолитом) руд Кестер в Верхоянском поясе (рис. 1).

Реальный вклад в мировое производство лития рудных месторождений амазийского цикла вносят салары. Их распределение по континентам мира, по данным Британской геологической службы, приведено в работе [13].

Значение прочих типов невелико: отрабатывается месторождение Ичунь, где литиевые слюды концентрируют после извлечения танталониобатов; наполовину отработано и законсервировано Завитинское месторождение. Месторождения Ядар и Такер-Пасс находятся в стадии проектирования горно-обогачительных комплексов для их освоения [21].

Примеры месторождений геолого-промышленных типов лития. Представителем *пегматитового* типа служит месторождение Гринбушес в Австралии [21]. Шахта Гринбушес в Западной Австралии является крупнейшей действующей литиевой шахтой в мире. Она расположена в графстве Бриджтаун-Гринбушес, Западная Австралия (рис. 2).

Район месторождения Гринбушес включает выходы пегматитов литий-цезий-танталового семейства, расположенных вдоль крупной северо-западной региональной зоны разломов. Полагают, что месторождение Гринбушес образовалось примерно 2,5 млрд лет назад. Основная рудная зона длиной 3 км и шириной до 300 м сложена пегматитом. Вдоль основной пегматитовой жилы



Рис. 2. Пегматитовое месторождение лития Гринбушес в Западной Австралии – ведущий мировой источник сподумена (Photograph courtesy of Talison Lithium Ltd) [17]

расположено несколько небольших пегматитовых даек и линз [17].

Литиевый рудник Гринбушес – крупнейшее в мире предприятие. Расположен к югу от одноименного города. Ежегодно производится около 1,95 млн т литиевого сподумена. Логистика крайне благоприятная – он находится в 250 км от Перта и в 90 км к юго-востоку от порта Бинберн, крупного порта для перевалки сыпучих материалов на юге Западной Австралии. Месторождение при нынешнем уровне отработки может удовлетворять 1/3 мирового спроса на концентрат литиевого сподумена.

В настоящее время в Гринбушес проводятся работы, направленные на увеличение площади рудника и модернизацию существующих мощностей по отработке руды. Ожидается, что это приведет к увеличению производства сподуменовой руды и литиевого минерального концентрата на месторождении Гринбушес с целью удовлетворения растущего мирового спроса на литиевую продукцию.

По состоянию на декабрь 2012 г. доказанные и вероятные запасы литиевой шахты Гринбушес оцениваются в 61,5 млн т с содержанием лития 2,8 %. По оценкам, в шахтном поле содержится около 4,3 млн т лития в эквиваленте карбоната [17].

Представителем *гранитного* типа служит комплексное (тантал, литий и др.) месторождение Инчунь в Китае [19]. Месторождение расположено в провинции Цзянси юго-восточного Китая. Оно связано с интрузией биотитовых гранитов юрского возраста. Возраст биотитовых гранитов оценивается в 159 млн лет, мусковитовых гранитов основного объема массива – в 131 млн лет. Месторождение находится в юго-восточной части массива, площадь его выхода на поверхность составляет порядка 9,5 км².

Месторождение уникально по своей геохимической специализации – F, P, Li, Cs, Ta и минеральному составу слагающих его парагенезисов. Альбитизированные граниты этого массива содержат в числе породообразующих минералов – Cs-лепидолиты и содержащие фосфор калишпаты; среди аксессуарных минералов отмечаются фосфаты – апатит и амблигонит-монтебразит, поллуцит, флюорит, циркон, Cs-берилл; в числе рудных минералов – колумбит-танталит, воджинит, Ta-микролит, Ta-касситерит, сфалерит.

Ичуньский массив вскрыт многочисленными разведочными и эксплуатационными скважинами до глубины 250 м. Массив представляет собой разрез дифференциатов пород, где снизу вверх последовательно сменяются: средне-крупнозернистые протолитионитовые граниты → среднезернистые микроклин-альбитовые протолитионит-мусковитовые граниты → мелкозернистые альбитизированные мусковит-лепидолитовые граниты → мелкозернистые альбит-лепидолитовые граниты → альбитизированные и грейзенизированные топаз-лепидолитовые граниты и грейзены [19].

Специализация гранитов на фосфор подтверждается присутствием различных фосфатов: F-apatита (до 5,45 масс. % F), монацита и ксенотима в протолитионитовых гранитах. Состав монацитов близок к составу монацитов из протолитионитовых гранитов Орловского массива Li-F гранитов в Забайкалье и по содержанию Ca, Th, U соответствует минералу хуттониту, что свидетельствует о замещении U и Th → P3Э. В топаз-лепидолитовых гранитах верхних горизонтов идентифицированы топаз, микролит, циркон и Vi-минерал.

Температура образования протолитионитовых гранитов Ичуньского массива по изотермам

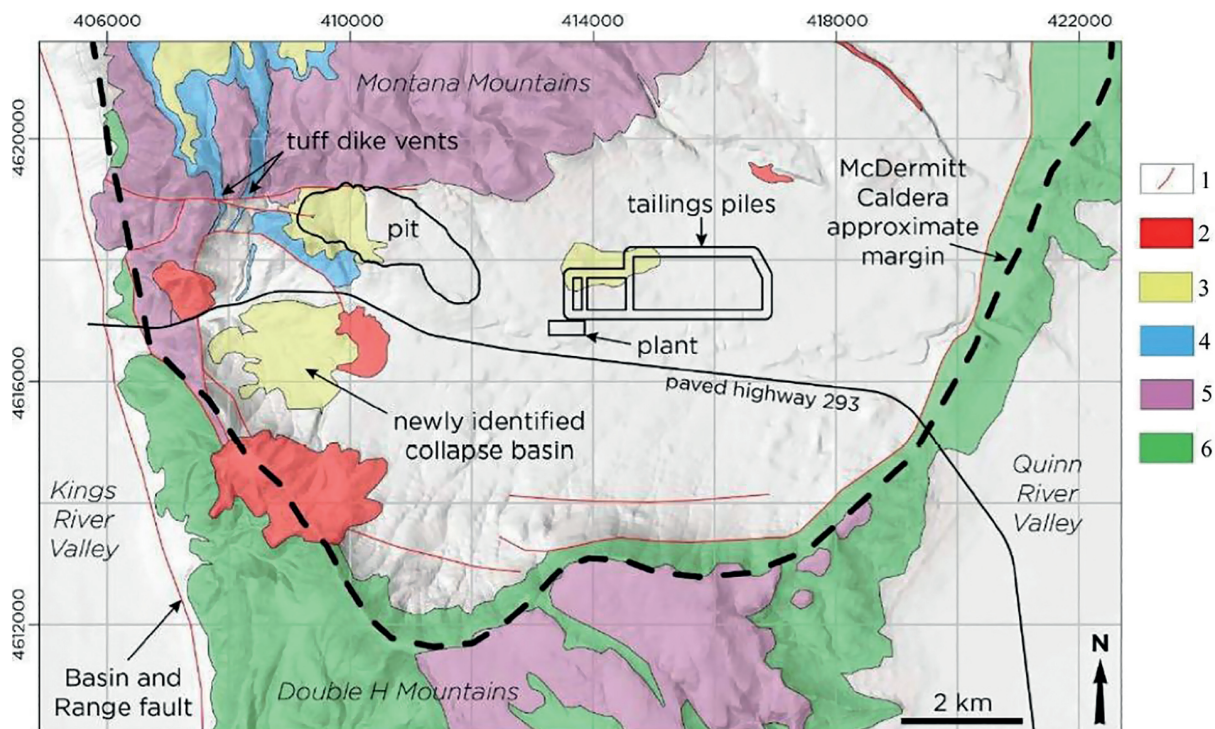


Рис. 3. Схематическая геологическая карта кальдеры Макдермитт (США) и объекта Такер Пасс – источник лития, локализованный в отложениях озера Кальдера [14]

1 – разрывные нарушения; 2 – посткальдерные породы; 3 – отложения кальдерного озера; 4 – туфы Кракер Крик; 5 – туфы Длинный Роджер; 6 – докальдерные породы

насыщения расплава цирконом соответствует $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, а топаз-лепидолитовых гранитов – $645\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует их кристаллизации из расплава. Однако состав акцессорных минералов, содержащих редкие элементы, указывает на сходство этого типа гранитов с гранитами массива Бавуара во Франции и Орловского массива в Восточном Забайкалье, для которых характерна сложная история формирования, связанная с процессами

перехода от магматического к постмагматическому и гидротермальному этапам [1].

Вулканогенно-осадочный тип представлен месторождением Такер-Пасс в США.

Литиевая шахта Такер Пасс – месторождение литиевой глины, это крупнейшее известное месторождение лития в США и одно из крупнейших в мире. С 2007 г. на Такер-Пасс ведется разведка [21]. На месторождении Такер Пасс

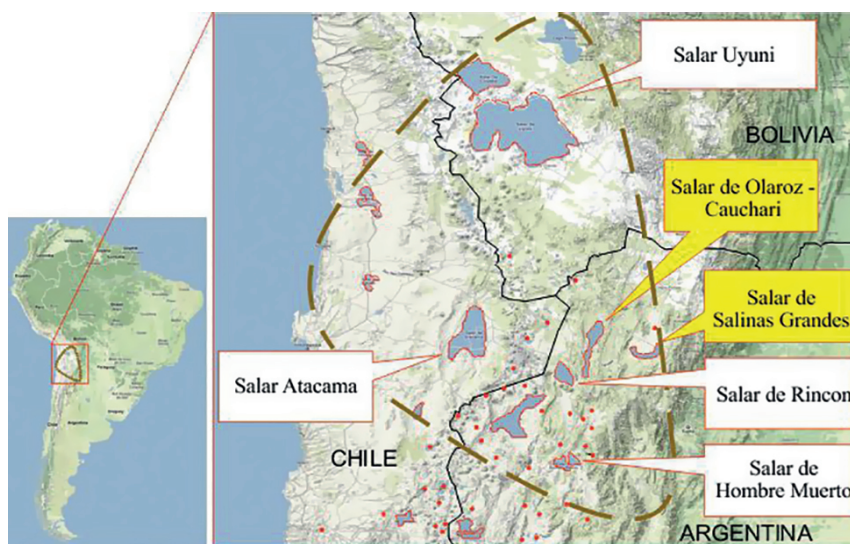


Рис. 4. Литиеносные эксплуатируемые и подготовленные к эксплуатации салары в Чили, Боливии и Аргентине (Южная Америка) (презентация компании Roskill) [13]



Рис. 5. Литиевое месторождение Салар-де-Уюни в Боливии [13]

Ведущие компании по добыче лития в мире (данные Wall Street Journal, Mining Global, Investing News) [15]

Название компаний	Страна	Рыночная капитализация, \$ млн	Количество сотрудников	Примечание
Savannah Resources	Великобритания	91,8	н. д.	Разработка в Португалии
Bacanora Lithium	КНР	209,12	н. д.	Разработка в Мексике
Piedmont Lithium Ltd.	США	715	н. д.	Разработка в Северной Каролине
Galaxy Resources Ltd.	Австралия	910	150	Разработка в Австралии, Канаде, Аргентине
Orocobre Ltd.	Австралия	1300	300	Разработка в Аргентине
Youngy Corporation Ltd.	КНР	1980	512	Отечественные объекты
Pilbara Minerals Ltd.	Австралия	2240	126	Отечественные объекты
Lithium Americas	Канада	2630	38	Разработка в США, Аргентине
Livent Corporation	США	3260	800	Разработка в Аргентине
Sichuan Yahua Industrial Group Co. Ltd.	КНР	3570	4043	Литиевые карьеры в Азии...
SQM	Чили	6440	5741	Отечественные объекты
Mineral Resources Ltd.	Австралия	6980	3100	Отечественные объекты
Tianqi Lithium	КНР	11 730	185	Проект Greenbushes в Австралии
Albemarle	США	18 380	6000	Разработка в США, Чили, Австралии
Jiangxi Ganfeng Lithium Co. Ltd	КНР	24 340	4844	Разработка в КНР, Австралии, Аргентине, Мексике

Примечание. н.д. – нет данных.

ресурсы составляют 13,7 млн т эквивалента карбоната лития при среднем содержании в руде 0,22 % лития (рис. 3). По оценкам компании Lithium Americas, на месторождении содержится извлекаемый литий на сумму 3,9 млрд долл.

Представителем *саларового* типа служат месторождения в Боливии, Чили, Аргентине и в ряде других стран (рис. 4). Это широко известные салары Атакама (Чили), Омбре-Муэрто, Ринкон (Аргентина), Уюни, Коипаса, Импекса (Боливия).

Салар-де-Атакама имеет площадь 3 тыс. км² и размеры около 100 на 80 км, что делает его третьим по величине месторождением в мире после солончака Салар-де-Уюни в Боливии (10 582 км²) и Салинас-Грандес в Аргентине (6000 км²). Средняя высота над уровнем моря составляет около 2300 м. Рельеф солончака довольно неровный, что обусловливается отсутствием на нем воды в отличие от большинства других солончаков, например, Салар-де-Уюни, который периодически заполняется неглубоким слоем воды. Солончак имеет несколько заполненных соленой водой лагун.

По данным Геологической службы США под Салар-де-Атакама содержится 27 % мировых запасов лития [19]. Литий сконцентрирован главным образом в подземных засоленных водах, которые выкачиваются на поверхность через сеть колодцев в крупные бассейны. Вода испаряется, а оставшаяся соль собирается для экстракции. Лагуна Чаха, являющаяся частью солончака, входит в национальный заповедник Лос-Фламенкос.

Большое количество лития находится в солончаковой пустыне Салар-де-Уюни (рис. 5) на юго-западе Боливии [17]. Под твердой коркой находится жидкий рассол с концентрацией лития в 0,3 %.

Экономические аспекты. По данным Геологической службы США (USGS) на 2021 г., выявленные запасы лития во всем мире значительно выросли и составляют около 86 млн т [13]. Боливия обладает самыми большими запасами в мире – 21 млн т, за ней следуют Аргентина (19,3 млн т), Чили (9,6 млн т), Австралия (6,4 млн т), Китай (5,1 млн т), Демократическая Республика Конго (3 млн т), Канада (2,9 млн т) и Германия (2,7 млн т). Представляется, что это лишь малая часть мировых запасов. Основные поставки лития ведутся из Австралии (18,3 тыс. т в год), Чили (14,1 тыс. т в год), Аргентины (5,5 тыс. т в год). Ведущее место на мировой арене занимают компании *Talison Lithium Ltd* (Австралия), *SQM* (Чили), *Jiangxi Ganfeng Tianqi* (Китай), *FMS* (Аргентина).

Месторождения лития также выявлены в Австрии, Сербии и Финляндии. Оптимизм в Европе вызвало установление крупных литиевых запасов в Португалии. Заинтересованность Франции, России и Китая к Мали не в последнюю очередь также связана с контролем над крупными месторождениями лития этой

страны. Определенный интерес представляют месторождения, расположенные в Кировоградской, Донецкой, Днепропетровской и Житомирской областях Украины [19].

Развитие литиевой промышленности требует наращивания добычи этого вида стратегического сырья. Крупнейшие добывающие компании приступили к масштабным поискам новых месторождений, а также усилили внимание к разработке технологий извлечения лития. Оценить их потенциал позволяют данные, приведенные в таблице.

Выводы. Таким образом за рубежом основным рентабельным источником лития в настоящее время являются месторождения гидроминерального сырья (салары). По мнению израильских специалистов, прогнозируемый прирост добычи лития в мировом масштабе может быть обеспечен тремя интенсивными путями: 1) повышением эффективности добычи лития из существующих сырьевых источников; 2) привлечением в качестве ресурсов бедных литиевых источников, таких как подземные рассолы, попутные нефтяные воды и воды озер с низким содержанием лития; 3) переработкой вышедших из строя литиевых батарей [15].

Характеристика основных промышленных типов месторождений, эпох рудогенеза лития в России приведены в современных монографиях [2; 6]. Сравнение минерально-сырьевой базы месторождений лития России с данными по зарубежным месторождениям, в том числе приведенными в данной статье, позволило заключить, что несмотря на значительные запасы лития на российских месторождениях, по разным причинам до сих пор продолжается его вынужденный импорт.

Выход из этой ситуации путем использования собственного сырья подсказывает решение совещания «Литий России: минерально-сырьевые ресурсы, инновационные технологии, экологическая безопасность» (май 2011 г., г. Новосибирск [6]):

В отношении эндогенных рудных объектов:

– геолого-экономическая переоценка запасов геолого-промышленных типов Завитинского, Гольцовского, Тастыгского, Алахинского и других месторождений сподуменового сырья с внедрением передовых инновационных технологий добычи и переработки руд;

– с целью прироста запасов лития – усиление прогнозно-поисковых работ на площади перспективных рудных объектов (Гольцовское месторождение, Восточный Саян, Калгутинский рудно-магматический район, южная часть Горного Алтая) с подготовкой технико-экономического обоснования добычи рудного сырья.

В отношении гидроминерального сырья (объектов саларного типа):

– с целью подготовки и оценки эксплуатационных запасов промышленных редкометалльных (литий и другие элементы) рассолов

Восточной Сибири проведение системных геологоразведочных работ с постановкой ценного сырья на государственный баланс;

– проведение работ по подготовке технико-экономического обоснования извлечения лития и сопутствующих ценных компонентов из подземных рассолов, связанных с алмазонасными кимберлитовыми трубками Якутии.

Реализации вышеизложенного может способствовать продолжению программы «Литий» в рамках Федеральной целевой программы «Редкие элементы» на основе государственно-частного партнерства при приоритетной поддержке Правительства РФ, Росатома, Роснедра и РАН [11].

Следует отметить, что в существенной мере проблема может быть решена при рациональном освоении литиеносных пегматитов Карело-Кольского региона и Забайкалья. В частности благоприятному освоению Колмозерского месторождения в Мурманской области способствует пример освоения его природного аналога – пегматитового месторождения Финляндии в районе Lannta/Osterbotten по новой технологии с использованием биогаза, что позволило организовать экономически эффективное производство качественного карбоната лития батарейного сорта [12].

Ревизия не востребованного потенциала месторождений отечественного литийсодержащего сырья (в пегматитовых и гидроминеральных объектах) при возобновлении и активизации работы по отработке геолого-промышленных типов месторождений лития является путем к освобождению экономики РФ от его импорта.

1. Антипин В. С. Петрогенетические и минералого-геохимические особенности редкометалльных литий-фтористых гранитов в разновозрастных ареалах магматизма Центральной Азии (Прибайкалье, Забайкалье, Монголия) / В. С. Антипин, Д. Одгэрэл, О. Гэрэл, А. Б. Перепелов, Л. В. Куц, Н. В. Шептякова // Петрология и геодинамика геологических процессов. Материалы XIII Всероссийского петрографического совещания (с участием зарубежных ученых). Т. 1. – Иркутск, 2021.

2. Борисенко Л. Ф. Месторождения литофильных редких металлов / Л. Ф. Борисенко, В. В. Бурков, Ю. Л. Капустин, Д. А. Минеев, Л. Н. Овчинников, Н. А. Солодов, К. Д. Субботин, Н. Ф. Челишев. – М.: Недра, 1980. – 559 с.

3. Загорский В. Е. Крупные поля сподуменовых пегматитов в обстановках рифтогенеза и постколлизийных сдвигово-раздвиговых деформаций континентальной литосферы / В. Е. Загорский, А. Г. Владимиров, В. М. Макагон, Л. Г. Кузнецова, С. З. Смирнов, Б. А. Дьячков, И. Ю. Анникова, С. П. Шокальский, А. Н. Уваров. Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 2. – С. 303–322.

4. Кудрявцев П. Г., Кудрявцев Н. П. Литий: ресурсы, добыча и перспективы развития мирового рынка // Международный научный журнал. Альтернативная энергетика и экология (ISJAE). – 2018. – № 10–12. – С. 70–81.

5. Линде Т. П. Экономическая оценка и перспективы использования минерально-сырьевой базы лития. Дисс. канд. экон. наук. – М., 2000 – 177 с. РГБ ОД61: 01-8/1469-3

6. Линде Т. П. Литий России, состояние, перспективы освоения и развитие минерально-сырьевой базы /

Т. П. Линде, О. Д. Ставров, Н. А. Юшко и др. // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. – 2000. – № 6. – 116 с.

7. Литий России: минерально-сырьевые ресурсы, инновационные технологии, экологическая безопасность. Матер. науч.-практич. совещ. Новосибирск, 24–26 мая. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – 141 с.

8. Месторождения стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации: закономерности размещения, условия формирования, инновационные технологии прогноза и освоения: Научные результаты, полученные при выполнении программы № 1, 48 фундаментальных исследований Президиума РАН / гл. ред. академик РАН Н. С. Бортников; отв. сост. чл.-корр. РАН В. А. Петров. – М.: ИГЕМ РАН, 2020. – 317 с.

9. Морозова Л. Н. Систематика литиевых пегматитов, типичные черты строения и состава. Труды ферсмановской научной сессии ГИ КЕЦ РАН. – 2018. – № 15. – С. 259–262.

10. Об утверждении Перечня основных видов стратегического минерального сырья: распоряжение Правительства РФ от 30.08.2022 №2473-р // Собр. Законодательства РФ. – 2022. – 2 сент.

11. Об утверждении федеральной целевой программы 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 ноября 1996 года № 1345 (с изменениями на 24 августа 2002 года).

12. 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. 2–8.

13. Bradley D., Munk L.-A., Jochens H., Hynek S., Laby K. A Preliminary Deposit Model for Lithium Brines. – USGS Open-File Report, 2013. – 9 p.

14. Castor S. B., Henry C. D. Litiumrich in the McDermitt caldera, Nevada, USA: geologic, mineralogical and geochemical characteristics and possible origin. – 2020. – Vol. 10. – Article 68. – 38 p.

15. Christmann P. Chapter 1 – Global lithium resources and sustainability issues / P. Christmann, E. Gloaguen, J.-F. Labbé, J. Melleton, P. Piantone // Lithium process chemistry: resources, ex-traction, batteries and recycling. – Amsterdam: Elsevier, 2015. – Pp. 1–40.

16. Greenbushes_Lithium Mine – world’s largest operating lithium. – 2020. – UPD: <https://www.nsenergybusiness.com/projects/greenbushes-lithium-mine>.

17. Greenbushes home to the world’s premier lithium mineral asset. – August 2022. – UPD: <https://www.talisnlithium.com>.

18. The Birth of The Lithium Millionaires. – Jun. 21, 2013. – UPD: <https://seekingalpha.com/article/1514842-the-birth-of-the-lithium-millionaires>.

19. USGS. Mineral Commodity Summaries, W. – 2012. – Pp. 94–95.

20. Haqqi T. 15 Biggest Lithium Mining Companies in the World. – February 10, 2021.

21. Technical Report on the Pre Feasibility for the Thacker Pass Project, Humboldt Country, Nevada, USA. – 2018. – 266 p.

1. Petrogeneticheskie i mineralogo-geohimicheskie osobennosti redkometall'nyh litij – fluor-istyh granitov v razno-vozrastnyh arealah magmatizma Central'noj Azii (Pribajkal'e, Zabajkal'e, Mongolija). V. S. Antipin, D. Odgjerjel, O. Gjerjel, A. B. Perepelov, L. V. Kushh, N. V. Sheptjakova. Petrologija i geodinamika geologicheskikh processov. Materialy XIII Vserossijskogo petrograficheskogo soveshhanija (s uchastiem zarubezhnyh uchenyh). Т. 1, Irkutsk, 2021.

2. Borisenko L. F. Mestorozhdenija litofil'nyh redkih metallov. L. F. Borisenko, V. V. Burkov, Ju. L. Kapustin, D. A. Mineev, L. N. Ovchinnikov, N. A. Solodov, K. D. Subbotin, N. F. Chelishhev. Moscow, Nedra, 1980, 559 p.
3. Zagorskij V. E. Krupnye polja spodumenovyh pegmatitov v obstanovkah riftogeneza i postkollizionnyh sdvigovorazdvigovyh deformacij kontinental'noj litosfery. V. E. Zagorskij, A. G. Vladimirov, V. M. Makagon, L. G. Kuznecova, S. Z. Smirnov, B. A. D'jachkov, I. Ju. Annikova, S. P. Shokal'skij, A. N. Uvarov. *Geologija i geofizika*. 2014, vol. 55, no. 2, pp. 303–322.
4. Kudrjavcev P. G., Kudrjavcev N. P. Litij: resursy, dobycha i perspektivy razvitiya mirovogo rynka. *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal. Al'ternativnaja jenergetika i jekologija (IS-JAEE)*. 2018, no. 10–12, pp. 70–81.
5. Linde T. P. Jekonomicheskaja ocenka i perspektivy ispol'zovanija mineral'no-syr'evoj bazy litija. Diss. kand. jekon. nauk. Moscow, 2000, 177 p. RGB OD61: 01-8/1469-3
6. Linde T. P. Litij Rossii, sostojanie, perspektivy osvoenija i razvitie mineral'no-syr'evoj ba-zy. T. P. Linde, O. D. Stavrov, N. A. Jushko and etc. Mineral'noe syr'e. Serija geologojekonomicheskaja. 2000, no. 6, 116 p.
7. Litij Rossii: mineral'no-syr'evye resursy, innovacionnye tehnologii, jekologicheskaja bezopasnost'. Mater. nauch.-praktich. soveshh. Novosibirsk, 24–26 maja. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2011, 141 p.
8. Mestorozhdenija strategicheskikh i vysokotehnologichnyh metallov Rossijskoj Federacii: zakonmernosti razmeshhenija, uslovija formirovanija, innovacionnye tehnologii prognoza i osvoenija: Nauchnye rezul'taty, poluchennye pri vypolnenii programmy № 1, 48 fundamental'nyh issledovanij Prezidiuma RAN. Gl. red. — akademik RAN N. S. Bortnikov. *Otv. Sost. chl.-korr. RAN V. A. Petrov*. Moscow, IGEM RAN, 2020, 317 p.
9. Morozova L. N. Sistematika litievych pegmatitov, tipichnye cherty stroenija i sostava. *Trudy fersmanovskoj nauchnoj sessii GI KEC RAN*. 2018, no. 15, pp. 259–262.
10. Ob utverzhdenii Perechnja osnovnyh vidov strategicheskogo mineral'nogo syr'ja: raspordzhenie Pravitel'stva RF ot 30.08.2022 №2473-r. *Sobr. Zakonodatel'stva RF*. 2022, 2 sept.
11. Ob utverzhdenii federal'noj celevoj programmy Dobycha, proizvodstvo i potreblenie litija i berillija. Razvitie proizvodstva tantala, niobija i olova na predpriyatijah ministerstva Ros-sijskoj federacii po atomnoj jenerгии: Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 10 November 1996 year № 1345 (s izmenenijami na 24 avgusta 2002 goda).
12. Tolkushkina E. A., Torikova M. V., Komin M. F. Mineral'no-syr'evaja baza litija: prob-lemy razvitiya i ispol'zovanija. *Mineral'nye resursy Rossii. Jekonomika i upravlenie*, 2012, no. 2, pp. 2–8.
13. Bradley D., Munk L.-A., Jochens H., Hynek S., Labay K. A Preliminary Deposit Model for Lithium Brines. *USGS Open-File Report*, 2013, 9 p.
14. Castor S. B., Henry C. D. Lithium-rich in the McDermitt caldera, Nevada, USA: geologic, mineralogical and geochemical characteristics and possible origin. 2020, vol. 10, article 68, 38 p.
15. Christmann P. Chapter 1 – Global lithium resources and sustainability issues. P. Christmann, E. Gloaguen, J.-F. Labbé, J. Melleton, P. Piantone. *Lithium process chemistry: resources, extraction, batteries and recycling*. Amsterdam, Elsevier, 2015, pp. 1–40.
16. Greenbushes Lithium Mine – world's largest operating lithium. 2020. UPD: <https://www.nsenerybusiness.com/projects/greenbushes-lithium-mine>.
17. Greenbushes home to the world's premier lithium mineral asset. August 2022. UPD: <https://www.talisonlithium.com>.
18. Technical Report on the Pre Feasibility for the Thacker Pass Project, Humboldt County, Nevada, USA. 2018. 266 p.
19. The Birth of The Lithium Millionaires. Jun. 21, 2013. UPD: <https://seekingalpha.com arti-cle/1514842-the-birth-of-the-lithium-millionaires>.
20. Haqqi T. 15 Biggest Lithium Mining Companies in the World. February 10, 2021.
21. USGS. Mineral Commodity Summaries, W. 2012, pp. 94–95.

Миронов Юрий Борисович – доктор геол.-минерал. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ¹. <Yuri_Mironov@vsegei.ru>
Карпунин Анатолий Михайлович – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹. <Anatoly_Karpunin@vsegei.ru>
Фукс Владимир Зиновьевич – ст. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹. <Vladimir_Fuks@vsegei.ru>

Mironov Yuriy Borisovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department, VSEGEI¹. <Yuri_Mironov@vsegei.ru>

Karpunin Anatoly Mikhaylovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, VSEGEI¹. <Anatoly_Karpunin@vsegei.ru>

Fuks Vladimir Zinov'evich – Senior Researcher, VSEGEI¹. <Vladimir_Fuks@vsegei.ru>

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, Russia 199106, .