

ИСТОРИЧЕСКАЯ МЕТАЛЛОГЕНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЛИТИЯ

Ткачев А.В., Рундквист Д.В., Вишневская Н.А.

ГГМ РАН, Москва; e-mail: a.tkachev@sgm.ru

Введение

Литий – очень важный для инновационной экономики вид минерального сырья, использование которого в мире постоянно растет вместе с развитием целого ряда современных отраслей промышленности. Особенно сильно увеличилось потребление этого элемента из-за роста объемов производства литий-ионных батарей и аккумуляторов для мобильных телефонов, смартфонов, планшетов, ноутбуков и других электронных устройств бытового, аэрокосмического, военного и медицинского назначения, электрических и гибридных автомобилей, солнечных и ветровых электрогенераторов. Очень широко литий используется для производства стекла, керамики и стеклокерамики, промышленных смазок, пластмасс и шинной резины, в выплавке стали, алюминия и особо легких авиационных сплавов, создании систем охлаждения, осушения и очищения воздуха, изготовлении лекарств, получении трития и еще целом ряде других современных производств [Christmann et al., 2015].

Лавинообразный рост потребления лития в последние 15 лет привел к увеличению объемов его ежегодной добычи: в 2018 г. она превысила 0.2 млн т в пересчете на Li_2O , что приблизительно в шесть раз больше, чем на рубеже XX и XXI веков [Jaskula, 2020; Ober, 2001]. Соответственно усилился интерес к данному виду сырья со стороны геологоразведочных компаний и служб во многих странах мира, которые в последние 20 лет стали активнее реализовывать поисково-оценочные и разведочные проекты как на ранее известных, так и вновь выявленных проявлениях лития на всех обитаемых континентах. Только запасы промышленных категорий в мире увеличились с начала XX в. больше чем в семь раз [Jaskula, 2020; Ober, 2001].

Аналогичные тенденции проявились и в количестве научных публикаций геологической, геолого-экономической и технологической направленности, рассматривающих литиевую проблематику на разных уровнях: от отдельного месторождения до глобального анализа [Линде и др., 2000; Christmann et al., 2015; Evans et al., 2014; Kesler et al, 2012; и ссылки там]. При том, что в этих и ряде других исследований вопросы типовой принадлежности, возраста и размещения важнейших месторождений мира в той или иной степени затрагивались, ни в одной из них, хотя бы на полуколичественном уровне, не было дано описания истории накопления промышленно интересных аккумуляций лития в земной коре и относительной роли каждого из известных типов его месторождений в разные геологические эпохи и за всю геологическую историю в целом. Единственным и очень скромным продвижением в этом направлении исследований можно считать диаграмму распределения на шкале времени ресурсов лития,

содержащихся в пегматитовых месторождениях [McCauley, Bradley, 2014]. Она создана на основе очень ограниченной выборки объектов и на текущий момент частично устаревших геохронологических и, особенно, ресурсных данных. Кроме того, шкала времени в этой работе разделена на большие сегменты по 100 млн лет, а сама диаграмма в оригинальной статье практически не анализируется. Для других типов месторождений лития такая работа вообще не проводилась. Более явным шагом вперед в рассматриваемом направлении стала недавняя статья авторов данной публикации [Ткачев и др., 2019]. Однако статья имела формат краткого сообщения, в котором ряд аспектов проблемы не мог быть рассмотрен. Кроме того, со времени написания статьи авторам удалось увеличить на треть размер выборки объектов анализируемых здесь типов и актуализировать некоторые геохронологические данные и заметную часть ресурсных оценок.

Среди всего спектра типов месторождений, пригодных для извлечение лития, к категории промышленных, то есть типов, которые или уже служат источником получения экономически значимых объемов данного вида сырья, или попадут в этот перечень в ближайшее время, так как находятся в стадии активного освоения, относятся объекты только четырех типов: а) пегматитового, б) гранитного, в) кальдерного, г) саларного [Линде и др., 2000; Christmann et al., 2015; Evans et al., 2014; Kesler et al., 2012].

В качестве перспективного источника лития часто также указываются геотермальные воды геодинамически активных областей и подземные воды нефтяных полей [Линде и др., 2000; Christmann et al., 2015; Kesler et al., 2012]. Эти два типа месторождений по агрегатному состоянию и химическому составу литий-содержащего сырья аналогичны саларам, но по средним содержаниям редко дотягивают до самых бедных рассолов в них. Изучение таких объектов литиеносных минеральных вод к настоящему времени не продвинулось дальше экспериментальных полупромышленных испытаний извлечения лития. Результаты последних нигде однозначно не подтверждали рентабельность производства, поэтому ни один из них пока не используется для промышленной добычи лития [Christmann et al., 2015; и ссылки там] и не может быть отнесен к промышленным по используемому нами критерию.

Вместе с тем нельзя не заметить, что месторождения в саларах содержат в себе не менее двух третей мировых запасов и с разной степенью детальности оцененных ресурсов лития [Ткачев и др., 2019; Christmann et al., 2015]. Однако в силу своего агрегатного состояния, они не имеют металлогенического значения вне современного периода, а достоверных данных для реальной оценки возможной роли саларов в геохимическом кругообороте лития в прошлые эпохи, древнее неогена, просто нет. Кроме того, все регионы распространения литиеносных саларов, имеющие вполне определенную геодинамическую обстановку, известны [Романюк, Ткачев, 2010; и ссылки там], а практически все их запасы и сопоставимые по качественным

характеристикам ресурсы уже оценены и не имеют перспектив значительного роста в обозримом будущем [Christmann et al., 2015]. В то же время, основная часть прироста и добычи, и новой сырьевой базы в мире в последнее десятилетие получены именно на твердофазных месторождениях лития. Более того, рудные месторождения и салары в течение последних лет поменялись местами в объеме извлечения лития: на рубеже XX и XXI вв. салары обеспечивали около 2/3 мирового потребления, а сейчас их доля вдвое меньше. Эта тенденция, судя по постоянно увеличивающемуся объему ведущихся геологоразведочных проектов на рудных объектах, будет только усиливаться. Поэтому авторы в данном исследовании сосредоточились на анализе особенностей исторической металлогении именно рудных месторождений, представляющих на настоящий момент основной интерес для геологоразведочных служб и компаний.

Непосредственной основой для проведения исследований послужили сведения из базы данных «Крупные и суперкрупные месторождения мира», созданной и постоянно пополняемой в ГГМ РАН [Рундквисти др., 2006], которая теперь общедоступна через интернет после создания ее ВЕБ-ГИС-версии [Ткачев и др., 2019]. В выборку для анализа были включены месторождения, ресурсная оценка которых (включая прошлую добычу, если она была) составляет не менее 0.1 млн т Li_2O . Нижний лимит среднего содержания был принят 0.4% Li_2O – минимум для появления практического интереса у геологоразведочных компаний к литиевому рудному объекту.

По итогам селекции в выборку попали 73 объекта трех металлогенических типов: пегматитового, гранитного и кальдерного (Таблица 1). Для геоисторического анализа они были распределены по суперконтинентальным циклам, геохронологические границы которых были обоснованы нами ранее [Ткачев, Рундквист, 2016]. Распределение выбранных месторождений на карте мира с идентификацией принадлежности к циклу и типу представлено на Рисунок 1.

Для анализа собранные данные сгруппированы по типам месторождений (Таблица 2), а их ресурсы распределены на шкале геологического времени, разделенной на сегменты по 50 млн лет (Рисунок 2). Полученные результаты достаточно выразительны.

Таблица 1. Металлогенические типы месторождений лития в проанализированной выборке

Металлогенический тип	Материнские магматические комплексы	Локализация рудных тел	Концентраторы лития в рудах*	Другие возможные полезные ископаемые Li-носных руд
Пегматитовый	плюмазитовые двуслюдяные и/или мусковитовые граниты и лейкограниты; пегматиты всегда вне материнских гранитов в метапородах любого состава, измененных на уровне не ниже верхней части зеленосланцевой фации	жилообразные и дайкообразные тела редкометалльных пегматитов, иногда одиночные, но обычно их группы, эшелонированные по простиранию и падению; минеральные типы и подтипы**: комплексный (микроклин-альбит-сподуменовый, микроклин-альбит-петалитовый, микроклин-альбит-лепидолитовый подтипы) и альбит-сподуменовый	<i>сподумен, петалит, лепидолит</i> , амблигонит, <i>эвкрипит</i> , <i>циннвальдит</i> , литиевый мусковит	Ta, Sn, Be, Cs, Rb, Nb
Гранитный	плюмазитовые Li-F редкометалльные граниты	грейзенизированные верхние части штоковидных, куполовидных или плитообразных массивов Li-F гранитов и их надинтрузивные грейзены; в пределах месторождения руды в гранитах богаче Li руд над ними	<i>лепидолит, циннвальдит, сподумен, амблигонит</i> , литиевый мусковит	Sn, флюорит, Be, Ta, Cs, Rb, Nb, W
Кальдерный	в состав магматических пород вмещающих кальдер могут входить в разном соотношении субвулканические тела, лавы и туфы составов от трахитов до онгонитов, меньше – андезиты и базиты	минерализованные слои или пластообразные зоны в породах, формировавшихся в очень крупных субаэральных кальдерах, включая осадки внутрикальдерных озер; вмещающие породы: туфоалевролиты, туффзитовые брекчии, туфы, туффиты, боратоносные слои, песчаники; подтипы: углеродистый, пепловый, глинистый, ядаритовый	<i>литиеносные монтмориллонит и иллит, ядарит, вулканический пепел</i> , гекторит, углеродистое вещество, лепидолит, литиевый мусковит	B, K

* перечислены в порядке частоты встречаемости промышленных концентраций в рудах; курсивом выделены минералы, которые могут сами по себе, в т.ч. без учета других минералов лития и минералов других редких металлов, определять промышленную ценность месторождений;

** по классификации минеральных типов редкометалльных пегматитов [Černý, Ercit, 2005], наиболее широко признанной специалистами всего мира.

Таблица 2. Распределение ресурсов лития по суперконтинентальным циклам и типам месторождений

Цикл	все типы					пегматитовый					гранитный					кальдерный					
	N	R	R _{ср}	C	X	N	R	R _{ср}	C	x	N	R	R _{ср}	C	x	N	R	R _{ср}	C	x	
Кенорский	26	21967	845	1,37	33,9	26	21967	845	1,37	100,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Колумбийский	11	4248	386	1,12	6,6	11	4248	386	1,12	100,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Родинийский	2	7240	3620	1,44	11,2	2	7240	3620	1,44	100,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Пангейский	23	16197	704	1,20	25,0	16	13754	860	1,30	84,9	6	2320	387	0,66	14,3	1	123	123	0,58	0,8	
Амазийский	11	15105	1373	0,90	23,3	4	3279	820	1,35	21,7	2	801	401	0,69	5,3	5	11025	2205	0,78	73,0	
Все циклы	73	64756	887	1,14	100,0	59	50487	856	1,43	78,0	8	3121	390	0,67	4,8	6	11148	1858	0,77	17,2	

Примечание: N – количество КСКМ, R – их интегральные ресурсы, тыс. т Li₂O (прошлая добыча+запасы+прогнозные ресурсы высокой достоверности), R_{ср} – количество ресурсов, приходящееся на одно КСКМ, тыс. т Li₂O, C – средневзвешенное содержание Li₂O в %, X – доля цикла в ресурсной базе КСКМ лития в целом по всей выборке, %, x – доля данного типа в ресурсах выборки соответствующего цикла, %.

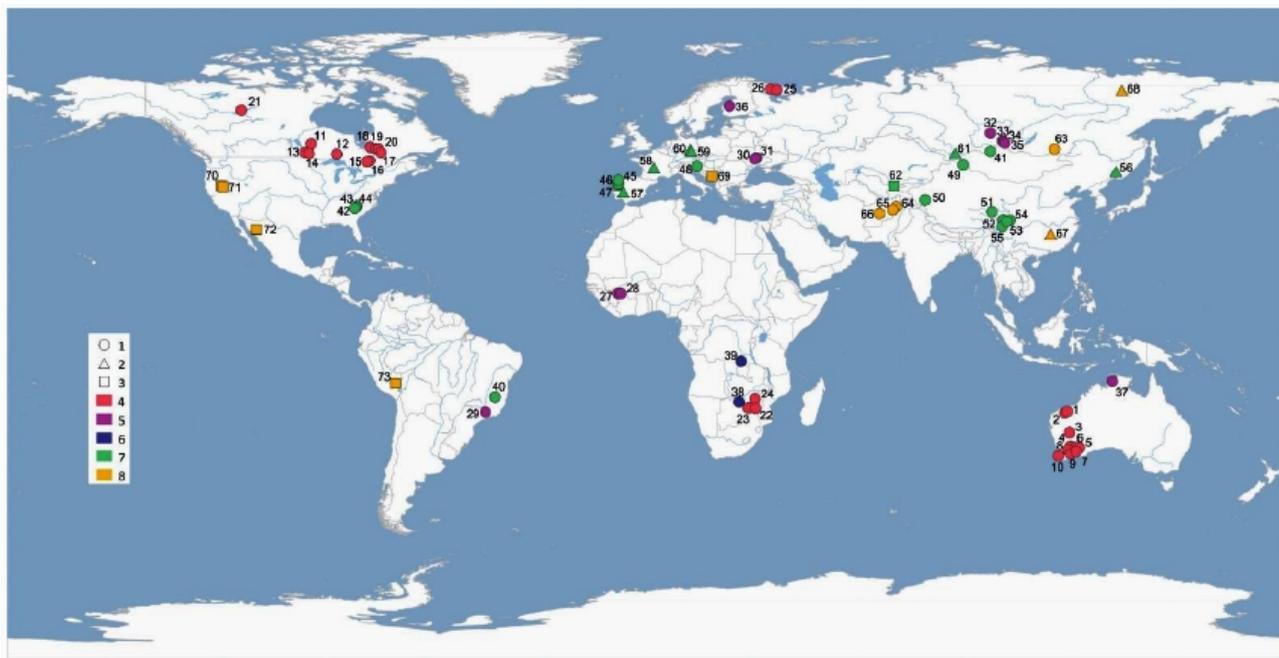


Рисунок 1 – Размещение месторождений лития, вошедших в анализируемую выборку.

Условные обозначения: 1-3 – типы месторождений: 1 – пегматитовый, 2 – гранитный, 3 – кальдерный; 4-8 – суперконтинентальные циклы: 5 – кенорский, 6 – колумбийский, 7 – родинийский, 8 – пангейский, 9 – амазийский.

Месторождения (полезные ископаемые в руде / возраст, млрд лет): 1 – Пилгангура (Li, Ta, Sn, Be / 2.88), 2 – Воджина (Li, Ta, Sn, Be / 2.87), 3 – Кэттлин-Вэлли (Li, Ta / 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 – Эрл-Грей (Li / 2.63), 9 – Маунт-Кэттлин (Li, Ta, Be / 2.63), 10 – Гринбушес (Li, Ta, Sn, Nb / 2.53), 11 – Пакеагама-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 – Отье (Li / 2.65), 16 – Лакорн (Li / 2.65), 17 – Моблан (Li / 2.64), 18 – Джеймс-Бэй (Li / 2.62), 19 – Роуз (Li, Ta, Rb, Cs, Be / 2.62), 20 – Вабуши (Li, Be / 2.58), 21 – Йеллоунайф-Болью (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 – Вольта-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, Rb, Cs / 1.84), 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 – Оутовеси (Li / 1.79), 37 – Обсервейшн-Хилл (Li, Ta, Sn / 1.73), 38 – Камативи (Sn, Li, Ta, Be / 1.04), 39 – Маноно-Китотоло (Li, Ta, Sn / 0.95), 40 – (Li, Ta, Sn / 0.51), 41 – Тастыгское (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 – Линкольнтон (Li, Sn, Ta, Be / 0.36), 45 – Альберта (Ta, Li, Sn / 0.31), 46 – Сепеда (Li, Sn / 0.31), 47 – Барросу (Li / 0.31), 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 / 0.20), 53 – Лицзягоу (Li, Be, Sn, Ta / 0.20), 54 – Данба (Li, Ta / 0.20), 55 – Цзязика (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 – Садисдорф (Li, Sn, W / 0.33), 60 – Циновец – Цинвальд (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, B / 0.02), 70 – Кингс-Вэлли-Саут (Li, K / 0.015), 71 – Такер-Пасс (Li, K / 0.015), 72 – Лавентана-Эльсаус (Li, K / 0.02), 73 – Фальчани (Li / 0.015)..

Сравнение суперконтинентальных циклов в металлогении рудных месторождений лития

Кенорский цикл представлен месторождениями исключительно пегматитового типа.

Примечательно, что самые древние из известных проявлений литиевой минерализации (сподумен, лепидолит, холмквистит, литиевый мусковит, эльбаит), которые не вошли в выборку из-за бедности руд и малых масштабов их накопления, принадлежат к объектам именно этого

типа – это альбит-сподуменовые редкометалльные пегматиты комплекса Древних Гнейсов Свазиленда и гранит-зеленокаменного пояса Барбертон кратона Каапваль [Ткачев, 2011; и ссылки там]. Их возраст варьирует в интервале 2.99-3.08 млрд лет (Рисунок 2). Пегматиты, представляющие экономический интерес и отвечающие предложенным лимитам количества и качества сырья, появились, по-видимому, только в конце мезоархея. В нашей выборке они представлены объектами с кратона Пилбара – Пилгангура и Воджина (Рисунок 1).

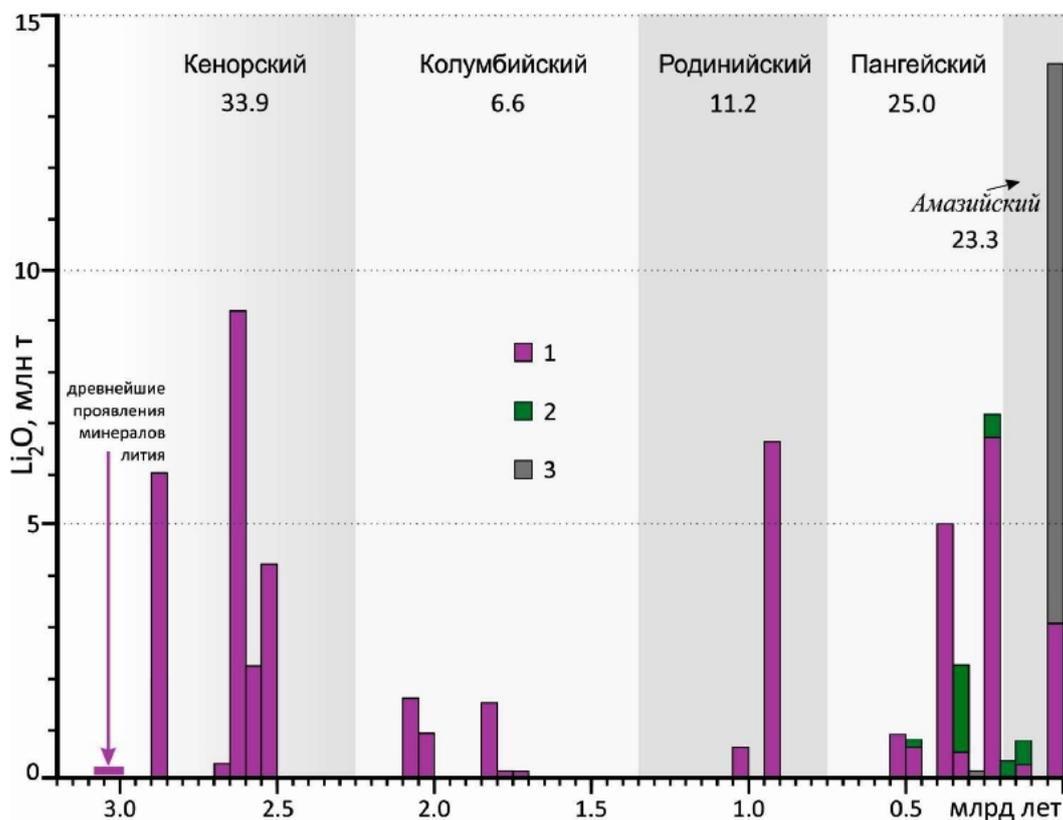


Рисунок 2 – Распределение на оси геологического времени ресурсов лития в месторождениях выборки.

Числа под названиями суперконтинентальных циклов – доли (%) этих циклов в суммарных ресурсах всей анализируемой выборки. Условные обозначения для типов месторождений: 1 – пегматитовый, 2 – гранитный, 3 – кальдерный.

Неоархейские месторождения лития намного многочисленнее мезоархейских, и география их 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 своей природе поясах на кратонах Слейв (Йеллоунайф-Большю), Зимбабве (Бикита, Аркадия, Зулу) и Кольском (Колмозерское, Полмостундровское).

Минералогия лития в пегматитовых месторождениях любого возраста всегда представлена несколькими минеральными фазами, но в большинстве случаев главный, а чаще всего и

единственный интерес для его промышленного получения представляет сподумен, являющийся или продуктом первичной кристаллизации из расплава, или результатом субсолидусного распада петалита. В кенорском цикле в нескольких объектах есть примеры экономически интересных аккумуляций и других минералов лития, для которых разработаны, а в ряде случаев и реализованы, технологические схемы получения самостоятельных концентратов: амблигонита (Танко, Бикита), лепидолита (Бикита), петалита (Бикита, Зулу, Аркадия), эвкриптита (Бикита). Месторождение Сепарейшн-Рэпидз – редкий пример месторождения лития, в котором сподумен не предполагается извлекать в отдельный концентрат совсем: только петалит и, вероятно, лепидолит.

В целом, кенорский цикл имеет в выборке наибольшее количество и месторождений, и оцененных в них геологоразведочными работами ресурсов (Таблица 2). По средним содержаниям кенорский цикл уступает только родинийскому, чья сырьевая база статистически обоснована слабо (см. ниже). Месторождения кенорского цикла решающим образом способствовали увеличению объемов добычи литиевого сырья: в последние годы более половины лития извлекается из пегматитовых руд кратонов Пилбара и Йилгарн, а в совокупности с залежами кратонов Сьюпериор и Зимбабве это значение приближается к двум третям [Jaskula, 2020]. На этих же кратонах ведутся активные геологоразведочные работы, в т.ч. и на объектах пока не вошедших в анализируемую выборку.

Колумбийский цикл также представлен только пегматитовым типом (Таблица 2), объекты которого 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 (Рапасаарет-Оутовеси) и Пайн-Крик позднего палеопротерозоя (Рисунок 1, Рисунок 2). В месторождениях Украинского щита практически весь извлекаемый литий сосредоточен в петалите. Технология получения петалитового и эвкриптитового концентратов, помимо сподуменового, разработана для Вишняковского месторождения [Линде и др., 2000]. В остальных объектах цикла для получения лития экономически интересен только сподумен.

Этот цикл уступает кенорскому по всем параметрам сравнения оцененных ресурсов и всем прочим циклам – по общим ресурсам. По количеству месторождений он превосходит только родинийский цикл, а по среднему содержанию лития в руде – один амазийский (Таблица 1). Добычные работы ведутся только на Вольта-Гранде, а активное разведочное бурение – в орогенных поясах Эбурнейский, Свекофеннский и Пайн-Крик.

Родинийский цикл идентичен кенорскому и колумбийскому по типовому однообразию месторождений лития (Таблица 2, Рисунок 2). При этом он уступает всем циклам по общему

количеству объектов в выборке: их всего два. Оба локализованы в грэнвиллидах юга Центральной Африки: Маноно-Китотоло в Кибарском поясе и Камативи в активизированном в конце мезопротерозоя кристаллическом массиве Дете-Камативи (Рисунок 1).

Цикл значительно превосходит все остальные циклы по среднему количеству ресурсов, приходящемуся на один объект, и среднему качеству сырья. Это обусловлено тем, что в выборку цикла входит крупнейшее по выявленным ресурсам в мире рудное месторождение лития Маноно-Китотоло, которое по завершению всех запланированных на нем геологоразведочных работ обещает еще сильнее укрепить свой статус. Вместе с тем, выборка по циклу очень мала, что резко повышает вес параметров гигантского объекта при расчетах средних значений (Таблица 2). По общему же количеству ресурсов этот цикл превосходит только колумбийский.

В месторождениях цикла основной практический интерес представляет сподумен, хотя получение лепидолитового концентрата при отработке некоторых участков Маноно-Китотоло тоже возможно. Оба месторождения ранее отрабатывались на Sn и Ta с поверхности, где развита мощная кора выветривания, в которой минералы лития не устойчивы. Геологоразведочные работы последних лет нацелены на наращивание ресурсной базы именно литиевых руд.

Пангейский цикл – древнейший, в котором месторождения лития представлены всеми рассматриваемыми типами. Накопление основной доли ресурсов в нем снова предопределили пегматитовые объекты (Таблица 2), наиболее значительные из которых установлены в Аппалачском поясе (Кингс-Маунтин и др.) и поясе Сонпань-Ганьцзы, включая его северо-западное продолжение в Кунь-Луне (Цзяцзика, Байлуншань и др.) (Рисунок 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 палеозоидах Альпийского (Вайнебене). Только в Сепеда главный концентратор лития – петалит, в остальных – сподумен, а в Коктогае заметная роль и у лепидолита.

В этом цикле впервые Li-F редкометалльные граниты и связанные с ними грейзены появляются среди промышленно интересных объектов лития (Таблица 2, Рисунок 1 и Рисунок 2). Этот тип месторождений по внутрикоровому происхождению материнских магм, появлению в орогенных поясах на посторогенной стадии их развития, минеральному и валовому химическому составу, в том числе и для элементов, определяющих рудоносность, имеет значительное сходство с редкометалльными пегматитами. Однако локальные геологические условия залегания и морфологические особенности интрузий Li-F гранитов, заметная роль в ресурсной базе многих объектов не только внутри-интрузивной минерализации, но и надинтрузивных грейзенов, а также совокупность структурно-текстурных особенностей рудоносных

зон заметно отличают этот тип от пегматитового и дают основания для его выделения в классификации месторождений редких металлов [Солодов, 1980].

Известно о шести месторождениях литиеносных руд данного типа, возникших в пангейском цикле: 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 (Рисунок 1). Минералогия лития в каждом из них многофазна, но рудный потенциал каждого конкретного объекта всегда определяет какой-то один минерал: в двух последних это циннвальдит, в алахинском – сподумен, в остальных – лепидолит. В Вознесенском и Сан-Хосе оцененные руды находятся только в надинтрузивной зоне, в остальных случаях все ресурсы или их главная часть сосредоточена в верхней части массивов Li–F гранитов.

Единственное месторождение кальдерного типа Шавазсай, локализованное в Тяньшаньском поясе в краевой части Чилтенской палеокальдеры, имеет скромнейшее значение в ресурсах лития, накопленных в пангейском цикле (Рисунок 1, Таблица 2). Оно интересно как древнейший представитель залежей своего типа среди литиеносных объектов. На месторождении все породы имеют повышенный фон лития, но его промышленно интересные концентрации оконтурены только в метасоматизированных туфоалевролитах с повышенным содержанием углеродистого вещества, кремнезема и карбонатов, а также в телах флюидизитовых агломератовых брекчий [Мамарозиков и др., 2012].

В целом, пангейский цикл – второй по количеству оцененных ресурсов после кенорского, уступая ему, а также родинийскому циклу, в средних содержаниях полезного компонента. В настоящее время отрабатываются для извлечения лития некоторые пегматитовые жилы на месторождениях в поясах Арасуай и Аппалачском, но их вклад в мировой рынок этого вида сырья очень скромный, хотя принципиален для добывающих отраслей Бразилии и США, соответственно. Более существенны масштабы добычи в пегматитовых месторождениях пояса Сонпань-Ганцзы, где находится крупнейший производитель сподуменового концентрата КНР рудник Цзяцзика. Во всех этих поясах продолжаются активные работы по оценке новых объектов в пегматитах. Все перечисленные выше месторождения гранитного типа Герцинского пояса прежде отрабатывались Sn и W, но были законсервированы. Возобновлению интереса к ним из-за лития привело к проведению здесь, а также на некоторых пегматитовых объектах этого пояса, новых геологоразведочных работ на данный вид сырья, в иногда ключавших даже переоценку старых отвалов обогатительных фабрик. При извлечении флюорита из грейзеновых руд Вознесенского месторождения лепидолит также уходил в хвосты обогащения, вмещающих теперь значительную долю общих ресурсов лития на объекте. Месторождение Коктогай истощено прошлой добычей и уже много лет законсервировано.

Амазийский цикл имеет свои особенности, которые затрудняют его по-настоящему объективное сравнение с остальными периодами геологической истории. Во-первых, он еще далек от завершения, и главные события грядущих фаз становления суперконтинента еще только ожидаются в очень далеком будущем [Duarte et al., 2018]. Во-вторых, сейчас доступны ресурсы лития в месторождениях, аналоги которых вполне вероятно существовали прежде, но не могли в принципе сохраниться из-за своей фазовой природы – это рассолы в саларах. По причинам, изложенным во вводном разделе данного исследования, этот тип месторождений исключен из нашего анализа.

Наиболее значительные ресурсы руд лития цикла заключены в объектах кальдерного типа (Таблица 2, Рисунок 2). Этот тип самый малоизученный во всех аспектах, так как попал в круг пристального интереса геологоразведочных и горнорудных компаний, занимающихся литием, а потому и в сферу повышенного внимания ученых, намного позже остальных типов. Основная информация о части из них пока преимущественно содержится в технических докладах геологоразведочных организаций. Поэтому их характеристика сделана более детальной, чем месторождений других типов.

Все месторождения и появления данного типа имеют значительное сходство в условиях залегания руд: краевые зоны субаэральных вулканических кальдер, наличие богатых литием пород онгонитового типа, включая их туфогенные и туфогенно-осадочные разности, и стратонидная морфология рудных тел. Однако они имеют и некоторые различия, позволяющие их разделить на четыре пока малочисленных подтипа.

Первый из них представлен описанным выше месторождением Шавазсай пангейского цикла. Оно единственное связано с постколлизийным, а не с синаккреционным магматизмом, и имеет специфический состав руд как по составу концентратов 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 МакДермитт оценены месторождения Такер-Пасс и Кингс-Вэлли-Саут (Рисунок 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 в туфогенных глинах, накопившихся в перикальдерных озерах, 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 недавно завершена предварительная оценка месторождения Фальчани, связанного со слоями пепловых туфов, которые практически не изменены ни эпитеpmальными, ни гипергенными процессами. Весь литий сосредоточен в вулканическом стекле пепловых частиц, что предопределяет название подтипа – пепловый.

Наконец, в Балканском орогенном поясе в межгорной депрессии Ядар выявлено одноименное месторождение в озерных вулканогенно-осадочных породах. 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. Гигантские месторождения миоценового возраста только боратовых руд подобного типа, связанных с озерным эвапоритогенезом в вулканических палеодепрессиях геодинамически и вулканически активных областей, известны как в близлежащем Анатолийском поясе, так и в провинции Бассейнов и Хребтов [Романюк, Ткачев, 2010]. Однако там в межборатных слоях литиевое оруденение не известно. Данный подтип следует называть ядаритовым.

Генезис месторождений кальдерного типа пока еще слабо изучен. На данный момент наиболее аргументированная модель основана на результатах геолого-структурного, минералогического, геохимического и геохронологического изучения месторождения Такер-Пасс в палеокальдере МакДермитт [Castor, Henry, 2020]. Согласно этим данным, 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 (Рисунок 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 (Таблица 2).

Наименьший вклад в ресурсный потенциал лития в амазийском цикле внес гранитный тип (Таблица 2). 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 (Рисунок 2): крупнейшее в мире месторождение лепидолитовых руд Ичунь в Южно-Китайском поясе и потенциально крупнейшее месторождение амблигонитовых (с лепидолитом) руд Кестер в Верхоянском поясе (Рисунок 1).

Реальный вклад в мировое производство лития рудных месторождений амазийского цикла, в отличие от саларов, пока невелик: отрабатывается Ичунь, где литиевые слюды концентрируют после извлечения танталониобатов, и наполовину отработано, но законсервировано Завитинское. Месторождения Ядар и Такер-Пасс находятся в стадии проектирования горно-обогатительных комплексов для их освоения.

Сравнение месторождений разных типов по ресурсам и содержанию лития

Сравнение пегматитовых месторождений лития между собой показывает, что абсолютное их большинство, независимо от возраста, попадают в относительно узкую «полосу» в интервале содержаний 0.9-1.5% Li_2O (Рисунок 3). Отклонения от этого интервала в обе стороны единичны. Специально отметим, что в области значений меньше 0.9% Li_2O нет ни одного объекта кенорского цикла, при том, что все три положительных «отскока» в область выше 2.0% Li_2O принадлежат только им: Бикита, Гринбушес, Танко.

Месторождения гранитного типа известны только в двух самых молодых циклах и имеют минимальный среди всех типов разброс значений количественных характеристик (Рисунок 3). Залежи, связанные с низкофосфористыми гранитами (Циновец–Циннвальд, Садисдорф), выделяются полным доминированием циннвальдита над лепидолитом в рудах. Однако в количественных параметрах рудоносности они ничем не отличаются от остальных объектов того же типа, но ассоциированных с высокофосфористыми гранитами, в рудах которых соотношение литиевых слюд обратное. Все точки объектов гранитного типа на анализируемой диаграмме располагаются рядом с точками тех пегматитовых объектов, что содержат самые бедные руды и ресурсы от минимальных до близких к средним по выборке.

Месторождения кальдерного типа амазийского цикла разместились в области выше средних значений всей выборки по количеству ресурсов, но разделились по содержаниям лития в рудах: объекты глинистого и пеплового подтипов попали на один уровень с гранитным типом, а единственный ядаритовый объект оказался выше даже большинства пегматитовых месторождений (Рисунок 3). Единственный объект углеродистого подтипа из пангейского цикла обладает характеристиками, близкими к минимальным и в количестве лития, и в его содержании в руде.

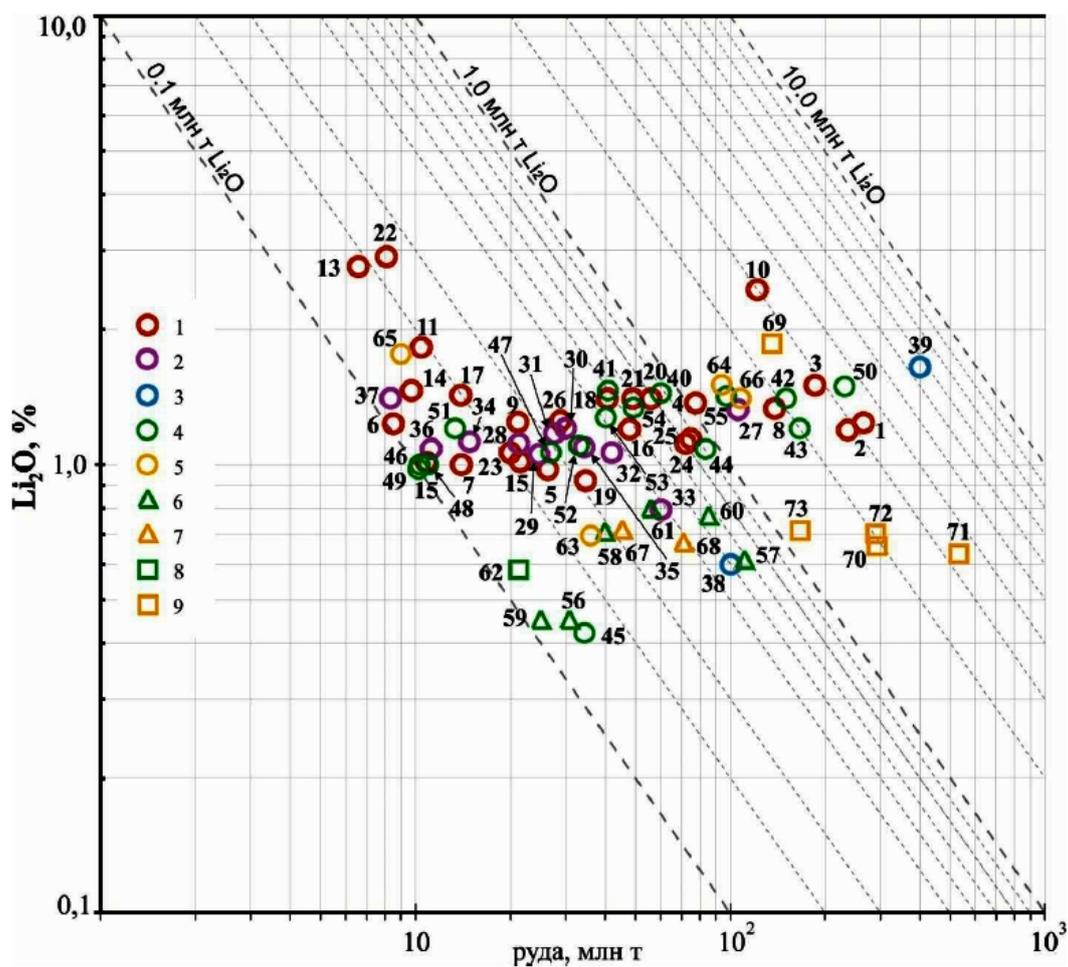


Рисунок 3 – Диаграмма «содержание–тоннаж» для анализируемой выборки месторождений лития (использован логарифмический масштаб по двум осям).

Нумерация точек соответствует нумерации месторождений на Рисунок 1. Условные обозначения для металлогенических типов месторождений и их принадлежности к суперконтинентальным циклам: 1-5 – пегматитовый разных циклов: 1 – кенорского, 2 – колумбийского, 3 – родинийского, 4 – пангейского, 5 – амазийского; 6-7 – гранитный двух циклов: 6 – пангейского, 7 – амазийского; 8-9 – кальдерный двух циклов: 8 – пангейского, 9 – амазийского.

Обсуждение результатов

Не все описанные выше эмпирические данные авторы уже готовы объяснить с позиций фундаментальных данных о геологической истории развития Земли. Однако для некоторых закономерностей такие объяснения можно предложить.

Все рудные месторождения лития, попавшие в анализируемую выборку, образуют на шкале геологического времени кластеры сближенных импульсов активной генерации (Рисунок 2). При этом интервалы между импульсами внутри кластеров многократно меньше промежутков в многие сотни миллионов лет, разделяющих сами кластеры. Заметим, что в пангейском и амазийском циклах, в которых формировались рудные месторождения всех трех рассматриваемых типов, гранитный и кальдерный типы не образуют импульсов, отдельных от пегматитового типа. Объекты последнего очень тесно связаны с эпохами активного орогенеза

[Tkachev, 2011], которые, в свою очередь, маркируют периоды активного формирования суперконтинентов [Condie, Aster, 2010]. С этим выводом согласуются и геологические данные по всем месторождениям выборки.

По нашему мнению, существует объяснение ярко выраженной многочисленности пегматитовых месторождений кенорского цикла (44% всех объектов данного типа в выборке) и особенно высокого качества руд в некоторых из них, таких как Танко, Бикита и Гринбушес. На общем фоне всех пегматитовых месторождений последние выделяет самая высокая степень дифференциации внутреннего строения мощных (70-300 м) и протяженных (1.5-3 км) тел с контрастным разделением в их объеме ряда минеральных фаз вплоть до образования простирающихся на сотни метров многометровых по мощности зон, резко обогащенных теми или иными минералами (вплоть до мономинеральности), в том числе представляющими интерес для извлечения Li, Ta, Cs, Be [Шмакин, 1987]. В некоторых таких зонах резко доминирует или сподумен, или петалит, или лепидолит и т.п. Эти особенно богатые или почти мономинеральные зоны даже могут эксплуатироваться отдельными системами горных выработок. В эпохах после кенорского цикла пегматитовые месторождения с тем же сложным комплексом редких металлов известны, однако нет примеров объектов со столь же крупномасштабными зонами контрастного минерального состава, которые можно было бы обрабатывать в течение многих лет селективно от прочих участков. Даже если подобная контрастная рудная зональность и проявлена в пегматитах более поздних эпох (например, в Коктогае), то количество и, особенно, масштабы этих зон несопоставимо меньше. Поэтому логично предположить существование в архее специфических условий, создававших режим особого благоприятствования для формирования в некоторых местах пегматитов с настолько контрастной дифференциацией вещества в крупных объемах. Вероятно, одно из таких особых условий – более высокая интенсивность теплового потока в земной коре, обусловленная повышенным уровнем архейских срединемантийных температур [Labrosse, Jaupart, 2007]. На этом фоне в абиссальных фациальных зонах релаксирующих орогенов, где формируются редкометалльные пегматиты [Романюк, Ткачев, 2010], очень вероятно не просто возникновение, а и намного более длительное ($n \cdot 10^7$ лет) высокотемпературного и одновременно низкоградиентного теплового поля. Подобные условия очень благоприятны для длительной многокамерной дифференциации гранитных расплавов и кристаллизации богатых редкими элементами пегматитовых тел при доминировании механизма гетерогенной нуклеации. Данный режим предполагает предельно низкие скорости роста минералов и высокую вероятность формирования сменяющих друг друга мономинеральных или почти мономинеральных зон [Ткачев, 1994; Swanson, 1977]. Все это – оптимальные условия для пространственного разделения в пегматитах элементов и минералов, в том числе рудоносных.

Резкое уменьшение количества пегматитовых месторождений лития в амазийском цикле относительно пангейского авторы связывают с двумя факторами. Во-первых, редкометалльные пегматиты формируются в абиссальных условиях и для их эксгумации на уровни, доступные для геологоразведочных работ, требуются от десятков до сотен миллионов лет. Поэтому вскрытость на эрозионном срезе объектов данного типа, возникших в амазийском цикле, минимальна из-за ничтожности их возраста по сравнению с аналогами в других циклах. Во-вторых, имеет значение и очевидная незавершенность цикла: редкометалльные пегматиты, в том числе и литиеносные, образуются коллизионных орогенах на стадии их коллапса [Tkachev, 2011]. Такие орогены наиболее интенсивно формируются на кульминационной стадии объединения ранее разрозненных сиалических блоков в гигантский суперконтинент [Rogers, Santosh, 2004]. Для будущего суперконтинента Амазия эта самая активная фаза образования коллизионных поясов еще только предстоит в далекой перспективе [Duarte et al., 2018].

Возможно, что в этой же категории факторов следует искать объяснение и минимальному количеству пегматитовых месторождений лития в родинийском цикле. Степень дробления континентальной коры на всем его протяжении была минимальной [Bradley, 2008], а потому и количество коллизионных орогенов, спаявших Родинию, было столь же аномально малым [Condie, 2013]. При том, что не в каждом орогене даже более продуктивных эпох зафиксированы пегматитовые месторождения лития, вероятность их формирования в родинийском цикле действительно пропорционально ниже. Однако продуктивность Кибарского пояса, в котором выявлено крупнейшее пегматитовое месторождение лития не только родинийского, но и всех остальных циклов (Манано–Китотоло), в реальности может быть выше наблюдаемой. На это, в частности, указывает, наличие здесь большого количества месторождений Sn и Ta в мощных корях выветривания пегматитов региона. Рудообразующие минералы лития в таких корях разрушаются, но могут сохраняться под ними. Именно такая ситуация имеет место и на Манано–Китотоло. Отсутствие выявленных его аналогов, если не по размеру, то хотя бы по типу, во многом обусловлено малым объемом геологоразведочных работ из-за многолетней политической нестабильности в этой части Африки. Впрочем, даже если здесь такие работы с позитивными результатами будут когда-нибудь проведены, неминуемое со временем увеличение количества выявленных и оцененных объектов, возникших в другие эпохи в других регионах, вряд ли позволит принципиально изменить общую картину о роли разных суперконтинентальных циклов в формировании ресурсного потенциала литиевых руд, представленную в данном исследовании.

Заключение

Проведенный анализ глобальной выборки месторождений, в которых заключены почти все промышленно значимые или потенциально экономически интересные запасы и ресурсы лития, показал, что они формировались в разные геологические эпохи в интервале от позднего мезоархея до миоцена. Размещение этих ресурсов на шкале геологического времени имеет ярко выраженный дискретный импульсный характер. Все импульсы тяготеют к периодам интенсификации орогенных процессов в глобальном масштабе, что характерно для тектонических фаз активного формирования суперконтинентов. Каждый из суперконтинентальных циклов, последовательно сменявших друг друга и определивших важнейшие черты геотектонического развития земной коры на протяжении последних трех миллиардов лет, имеет свои особенности в проявлениях металлогении лития.

В кенорский, колумбийский и родинийский циклы формировались только пегматитовые месторождения лития. В пангейском цикле основные ресурсы также связаны с пегматитовым типом, но небольшая часть локализована в объектах гранитного и кальдерного типов. Пока незавершенный амазийский цикл столь же разнообразен в типах рудных месторождений лития, как и пангейский, но с лидирующей ролью кальдерного типа в количестве выявленных ресурсов.

Среди рудных месторождений лития наиболее распространены объекты пегматитового типа, который является единственным сквозным в геологической истории. Максимальное количество месторождений данного типа, суммарных ресурсов в них и наиболее высокие средние содержания лития установлены для кенорского цикла. Это позволило предположить существование в архее особо благоприятных условий для возникновения продуктивных на литий пегматитов. Примечательно также, что пегматитовые месторождения именно кенорского цикла, в том числе и благодаря относительно высокому качеству руд, во многом обеспечили лавинообразный рост производства лития в мире в последние годы.

Значение месторождений других типов (гранитного и кальдерного) в ресурсной базе лития пока намного превосходит их реальную роль в добыче этого вида сырья. Однако высокий интерес к выявлению и оценке таких объектов со стороны геологоразведочных и горнодобывающих организаций во многих странах мира, указывают на вероятное изменение этой ситуации в ближайшем будущем.

Финансирование работ. Исследования выполнены при финансовой поддержке проектов государственных работ №0140-2018-0004 по программе № I.48 ФНИ президиума РАН (металлогенический анализ) и №0140-2019-0005 (геоинформационная система) в ФГБУН Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН (ГГМ РАН).

Список использованных источников

1. Линде Т.П., Ставров О.Д., Юшко Н.А., и др. Литий России: состояние, перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы // Минеральное сырье (серия геолого-экономическая). М.: ВИМС. 2000. № 6. С. 1–116.
2. Мамарозиков У.Д., Ахунджанов Р., Сайдыганиев С.С., и др. Онгонитовый магматизм Среднего Тянь-Шаня // Науки о Земле. 2012. №1. С. 14–31.
3. Романюк Т.В., Ткачев А.В. Геодинамический сценарий формирования крупнейших мировых миоцен-четвертичных бор-литиеносных провинций. М.: «Светоч Плюс», 2010. 304 с.
4. Рундквист Д.В., Ткачев А.В., Черкасов С.В. и др. Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. Т.1. Глобальные закономерности размещения. М.: ИГЕМ РАН, 2006, 390 с.
5. Солодов Н.А. Кислые редкометальные граниты // Месторождения литофильных редких элементов (Л.Н.Овчинников, Н.А.Солодов – ред.). М.: Недра, 1980. С. 62–82.
6. Ткачев А.В. Металлогеническая эволюция гранитного пегматитогенеза в истории Земли: основные тенденции и вероятные причины // Бюллетень Московского об-ва испытателей природы (МОИП), сер. Геологическая. 2011. Т. 86. № 1. С. 41–57.
7. Ткачев А.В. О происхождении зональности пегматитов // Отечественная геология. 1994. № 7. С. 52–58.
8. Ткачев А.В., Булов С.В., Чесалова Е.И. Геопортал «Металлогения» // Геоинформатика. 2019. №1. С. 3–12.
9. Ткачев А.В., Рундквист Д.В. Глобальные тенденции в эволюции металлогенических процессов как отражение суперконтинентальной цикличности // Геология рудных месторождений, 2016, т. 58, № 4, с. 295–318.
10. Ткачев А.В., Рундквист Д.В., Вишневская Н. А. Главные геоисторические особенности металлогении лития // ДАН. 2019. Т. 484. № 2. С. 200–205.
11. Шмакин Б.М. Пегматитовые месторождения зарубежных стран. М.: Недра, 1987. 224 с.
12. Bradley D.C. Passive margins through earth history // Earth-Science Reviews. 2008. V. 91. P. 1–26.
13. Castor S.B., Henry C.D. Lithium-rich claystone in the McDermitt caldera, Nevada, USA: geologic, mineralogical, and geochemical characteristics and possible origin // Minerals. 2020. V. 10. Article 68. 38 p.
14. Černý P., Ercit T.S. The classification of granitic pegmatites revisited // Canadian Mineralogist. 2005. V. 43. P. 2005–2026.

15. Christmann P., Gloaguen E., Labbé J.-F., et al. Chapter 1 - Global lithium resources and sustainability issues // *Lithium process chemistry: resources, extraction, batteries and recycling*. Amsterdam: Elsevier, 2015. P. 1-40.
16. Condie K.C. Preservation and recycling of crust during accretionary and collisional phases of Proterozoic orogens: a bumpy road from Nuna to Rodinia // *Geosciences*. 2013. V. 3. P. 240–261.
17. Condie K.C., Aster R.C. Episodic zircon age spectra of orogenic granitoids: the supercontinent connection and continental growth // *Precambrian Research*. 2010. V. 180(3-4). P. 227–236.
18. Duarte J.C., Schellart W.P., Rosas F.M. The future of Earth's oceans: consequences of subduction initiation in the Atlantic and implications for supercontinent formation // *Geological Magazine*. 2018. V. 155 (1). P. 45–58.
19. Evans K.R. Chapter 10 - Lithium // Gunn G. (ed.). *Critical metals handbook*. Hoboken, New Jersey, USA. Wiley-Blackwell. 2014. P. 230-260.
20. Jaskula B.W. Lithium // *USGS Mineral Commodity Summaries*, January 2020. P. 98–99 // <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/index.html#myb> (доступ 30.04.2020)
21. Kesler S.E., Gruber P.W., Medina P.A., et al. Global lithium resources: relative importance of pegmatite, brine and other deposits // *Ore Geology Reviews*. 2012. V.48. P. 55–69.
22. Labrosse S., Jaupart C. Thermal evolution of the Earth: secular changes and fluctuations of plate characteristics // *Earth Planet. Sci. Letters*. 2007. V. 260. P. 465–481.
23. McCauley A., Bradley D.C. The global age distribution of granitic pegmatites // *Canadian Mineralogist*. 2014. V. 52. P. 183–190.
24. Ober J.A. Lithium // *USGS Mineral Commodity Summaries*, January 2001. P. 96–97 // <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/lithium/450301.pdf> (доступ 30.04.2020)
25. Rogers J.J.W., Santosh M. *Continents and supercontinents*. Oxford University Press, 2004. 304 p.
26. Swanson S.E. Relation of nucleation and crystal-growth to the development of granitic textures // *American Mineralogist*. 1977. V. 62. P. 966–978.
27. Tkachev A.V. Evolution of metallogeny of granitic pegmatites associated with orogens throughout geological time // *Geological Society of London Special Publications*. 2011. V. 350. P. 7–23.