

УДК 553.493.5:553.078

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЛИТИЯ ОТ МЕЗОАРХЕЯ ДО СОВРЕМЕННОГО ПЕРИОДА: ИХ ТИПЫ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ВРЕМЕНИ, РАЗВЕДАННАЯ РЕСУРСНАЯ БАЗА*

© 2024 г. А. В. Ткачев^{1,*}, Н. А. Вишневская^{1,**}, Е. И. Чесалова^{1,***}

¹Государственный геологический музей РАН им. В.И. Вернадского (ГГМ РАН),
Моховая ул. 11, стр. 11, Москва, 125009 Россия

*E-mail: a.tkachev@sgm.ru

**E-mail: 200962@mail.ru

***E-mail: chesalova_ei@mail.ru

Поступила в редакцию 10.01.2024 г.

После доработки 11.06.2024 г.

Принята к печати 23.07.2024 г.

Проанализировано распределение месторождений и заключенных в них ресурсов лития в геологической истории. Основа для анализа — данные по 164 месторождениям со всего мира с ресурсной оценкой от 100 тыс. т Li₂O, которые представляют почти всю разведанную ресурсную базу, привлекательную в современных условиях и на ближайшую перспективу для добычи этого элемента. Вариативность разных аспектов их формирования в геологическом времени продемонстрирована на сопоставлении суперконтинентальных циклов по количеству и качеству ресурсов в месторождениях разных типов, возрастов и тектонических обстановок. Установлено, что месторождения лития имеют крайне неравномерное, импульсное, распределение на шкале геологического времени. Кенорский, колумбийский и родинийский циклы представлены только пегматитовым типом месторождений, интенсивность формирования которых снижалась в этом ряду. В пангейском цикле она вновь выросла, приблизившись к уровню кенорского цикла. Кроме того, появились первые месторождения гранитного типа. В текущем амазийском цикле месторождения гранитного типа количественно преобладают над пегматитовым типом, но они оба количественно уступают глинистому типу, проявленному только в этом цикле. По сумме ресурсов все эти три типа с твердыми рудами уступают месторождениям, связанным с рассолами в сарах, геотермальных и нефтегазовых полях. Все месторождения от кенорского до пангейского циклов формировались в коллизионных поясах на постороженной стадии их развития. В амазийском цикле преобладание в этом аспекте сохранилось, но также установлены месторождения гранитного и глинистого типа, которые формировались в тыловых зонах активных континентальных окраин. Месторождения в сарах тоже имеют две аналогичные тектонические позиции для размещения. Месторождения геотермального типа известны в обрамлении коллизионных орогенов и на активных окраинах континентов. Месторождения нефтегазовых полей разведаны только в осадочных чехлах древних платформ. В настоящее время максимальное значение для мировой экономики имеют объекты пегматитового и сального типов, в значительно меньшей степени — гранитного типа. Все они являются традиционными для извлечения лития. В пегматитовом типе наибольшую степень промышленного освоения имеют месторождения кенорского цикла, в гранитном типе — амазийского. В последние годы начали вовлекаться в эксплуатацию единичные месторождения глинистого, геотермального и нефтегазовых полей типов, а также представители сального типа с составами рассолов, которые прежде не подходили для традиционных технологий.

Ключевые слова: месторождение лития, металлогения лития, редкометалльные гранитные пегматиты, Li–F граниты, литиеносные глинистые породы, рассолы, суперконтинентальный цикл

DOI: 10.31857/S0016777024060037, EDN: wdxsla

* Дополнительная информация для этой статьи доступна по ссылке <https://doi.org/10.31857/S0016777024060037> для авторизованных пользователей.

ВВЕДЕНИЕ

Литий — очень важный для инновационной экономики элемент, получаемый из минерального сырья. Во всех экономически развитых странах мира он входит в список критически важных и/или стратегических видов минерального сырья (Бортников и др., 2023; Викентьев, 2023; Bradley et al., 2017; Christmann et al., 2015). Его использование в мире постоянно растет вместе с развитием целого ряда современных отраслей промышленности. Особенно сильно увеличилось потребление соединений этого щелочного металла 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 литиевые продукты используются 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 текущем веке привел к увеличению объемов его ежегодной добычи: в 2022 г. она превысила 280 тыс. т в пересчете на Li_2O , что на порядок больше, чем на рубеже XX и XXI веков (Jaskula, 2023; Ober, 2001). В последние годы более 90% всего лития, потребляемого ежегодно в мире, извлекается из месторождений всего трех стран: Австралии, Чили и Китая. По имеющимся прогнозам консалтинговых агентств и крупных производителей потребление литиевой продукции продолжит расти еще многие годы, причем до 2030 г. не менее высокими темпами, чем сейчас, и, преимущественно, за счет увеличения производства аккумуляторов для автомобилей и «зеленой» энергетики (Albemarle Corp., 2023; BloombergNEF, 2019; Statista, 2022; и др.). В связи с этим в последние годы имеет место наращивание мощностей на многих существующих предприятиях по добыче литиевого сырья, происходит освоение новых месторождений, разрабатываются проекты добывающих предприятий на ближайшую перспективу. Активизируются в этих направлениях не только традиционные страны-производители литиевой продукции,

но и те страны, где литий в промышленных масштабах не добывали очень давно (Россия, Германия) или даже никогда прежде (Великобритания, Мексика, Мали, Финляндия и др.).

Текущее и перспективное увеличение масштабов промышленного производства литиевых продуктов обеспечивается беспрецедентным ростом объемов геологоразведочных работ силами как частных компаний, так и государственных служб соответствующего профиля во многих странах мира. Именно в XXI в. реализация поисково-оценочных и разведочных проектов и на ранее известных, и на вновь выявленных проявлениях лития происходит с постоянно нарастающей экспансией на всех обитаемых континентах. Среди объектов таких работ появилось много месторождений новых типов, которые еще совсем недавно рассматривались только как потенциально перспективные (Ткачев и др., 2019; Christmann et al., 2015; Kesler et al., 2012; Munk et al., 2016). Сейчас они уже являются промышленно интересными, и на некоторых из них уже строятся предприятия по добыче минерального сырья и производству литиевых продуктов. Такая трансформация произошла благодаря двум основным взаимосвязанным факторам: с одной стороны, из-за резкого подъема спроса и цен, с другой — из-за появления разработанных рентабельных технологий извлечения лития из первичного сырья с более низкими содержаниями и менее благоприятным минеральным и/или химическим составом (Liu et al., 2023). В целом, интенсификация геологоразведочных и технологических работ в мире позволили с начала XXI в. больше чем в 7.5 раз увеличить запасы лития с доказанной положительной рентабельностью при промышленном освоении (Jaskula, 2023; Ober, 2001). Темпы роста общего количества ресурсов, подтвержденных геологоразведочными работами, но пока не апробированных детальными экономическими расчетами возможной эксплуатации, еще выше.

Параллельно наблюдается аналогичная тенденция к резкому росту и в количестве научных исследований геологической, геолого-экономической и технологической направленности, рассматривающих литиевую проблематику на разных уровнях: отдельных месторождений, металлогении и сырьевой базы лития регионов и стран, глобального анализа сырьевой базы, общей классификации месторождений и эволюционной минералогии лития (Боярко и др., 2022; Линде и др., 2000; Морозова, 2018; Похиленко и др., 2023; Толкушина и др., 2012; Bowell et al.,

2020; Bradley et al., 2017; Christmann et al., 2015; Dessemond et al., 2019; Evans et al., 2014; Grew et al., 2019; Gruber et al., 2011; Kavanagh et al., 2018; Kesler et al., 2012; Munk et al., 2016; Vikström et al., 2013; Zhang et al., 2022 и ссылки в них).

При этом такие аспекты, как последовательность накопления промышленно интересных аккумуляций лития в течение геологической истории земной коры, относительная роль каждого из известных типов месторождений в этом накоплении в разные геологические эпохи и за всю геологическую историю в целом, возможные эволюционные изменения в качественных и/или количественных характеристиках месторождений рассматривались очень редко. Пионерским, хотя и очень скромным, продвижением в данном направлении исследований, следует считать диаграмму распределения на шкале времени ресурсов лития в пегматитовых месторождениях, которая была опубликована в (McCauley, Bradley, 2014) и основана на данных о 20 объектах. Для настоящего времени это уже очень ограниченная выборка с частично устаревшими геохронологическими и принципиально устаревшими ресурсными данными. Кроме того, шкала времени в этой работе разделена на большие сегменты по 100 млн лет, а сама диаграмма в оригинальной статье практически не анализируется. Более явным шагом вперед в рассматриваемом направлении стали наши статьи (Ткачев и др., 2019; Tkachev et al., 2018), основанные на данных о 73 месторождениях, представляющих четыре их типа.

Колоссальный прогресс последних лет в технологических, геологоразведочных и научных работах на месторождениях лития и соответствующее увеличение массива новой информации сделали и возможным, и необходимым совершить новый шаг в анализе эволюционных аспектов металлогении лития. Это продвижение осуществлено авторами с использованием расширенной классификация типов месторождений лития, имеющих промышленное значение, и с более чем вдвое увеличенным количеством месторождений в анализируемой выборке. Причем объем выборки преимущественно вырос за счет месторождений традиционных, а не новых типов. Кроме того, были уточнены классификационные, геохронологические и ресурсные данные для ряда месторождений, использовавшихся в анализе прежде. Представляется, что все это позволило создать более объективную картину металлогении лития в геологическом времени.

ДАННЫЕ ДЛЯ АНАЛИЗА

Фактологической основой для проведения исследований послужили сведения из базы данных “Крупные и суперкрупные месторождения мира”, созданной и постоянно корректируемой в ГГМ РАН (Рундквист и др., 2006). В выборку для анализа были включены месторождения шести металлогенических типов (табл. 1), представители которых или эксплуатируются уже многие годы (пегматитовый, гранитный, сальарный), или находятся в стадии опытной эксплуатации и строительства первых добычных и перерабатывающих предприятий (глинистый, геотермальный, нефтегазовых полей), т.е. начали представлять интерес для промышленности недавно. Во всех месторождениях выборки литий является или главным, или принципиально важным попутным компонентом, а его ресурсная оценка, основанная на данных, полученных в результате геологоразведочных работ с опробованием канав, подземных горных выработок, буровых скважин, составляет не менее 100 тыс. тонн в пересчете на Li_2O . Для месторождений, оцененных с использованием советской и российской классификаций запасов и ресурсов, в эту сумму включались запасы всех категорий и ресурсы категории P_1 . Для месторождений, оцененных по классификациям JORC или NI 43–101, принималась сумма ресурсов категорий *measured+indicated+inferred*, а также запасы категорий *proved+probable*, если они не были учтены в ресурсах *measured+indicate*. В информационных источниках по месторождениям лития в Китае очень редко указывается категоризация запасов и/или ресурсов, хотя оригинальная классификация в этой стране существует. Авторами условно принималось, что публикуемые оценки запасов/ресурсов в использованных источниках информации о месторождениях Китая отвечают требованиям перечисленных выше классификаций других стран. Кроме того, в сумму всегда включались данные о прошлой добыче на объекте, при ее наличии. Далее в тексте для краткости изложения все величины разведанных запасов и ресурсов как отдельных месторождений, так и их групп, названы ресурсами.

По итогам селекции в выборку попали 164 месторождения с суммарными ресурсами 252.0 млн тонн Li_2O (табл. 2). Это самая большая выборка месторождений, когда-либо использованная для анализа особенностей глобальной металлогении и сырьевой базы лития в мире. Перечень месторождений, данные об их возрасте, парагенезисе

Таблица 1. Металлогенические типы промышленно значимых месторождений лития в проанализированной выборке

Металлогенический тип	Вмещающие комплексы	Локализация рудных тел	Концентраторы лития ¹	Другие полезные ископаемые ²
1	2	3	4	5
Пегматитовый	Редкометалльные пегматиты в метопородах любого состава, измененных на уровне от верхней части зеленосланцевой до середины амфиболитовой фации андалузит–силлиманитовой фациальной серии ³ ; пегматитовые поля обычно сопровождаются плюмазитовыми гранитами близкого возраста, которые могут быть или материнскими, или иметь только парагенетическую связь с пегматитами (общий источник плавления)	Жилообразные и дайкообразные тела редкометалльных пегматитов литиевого ряда LCT–типа ⁴ , иногда одиночные, но обычно их группы, эшелонированные по простиранию и падению; минеральные подтипы ⁴ : комплексный (микроклин–альбит–сподуменовый, микроклин–альбит–петалитовый, микроклин–альбит–лепидолитовый подтипы и их промежуточные формы) и альбит–сподуменовый	Сподумен, петалит, лепидолит, амблигонит, эвкрипитит, циннеальдит, литиевый мусковит	Ta, Sn, Cs, Rb, Be, Nb
Гранитный	Плюмазитовые Li–F редкометалльные граниты, онгониты, туфы и туфобрекчии их эффузивных аналогов в пределах магматических, вулканогенных или вулканогенно–осадочных комплексов пород, которые могут быть как изменены, так и не изменены региональным метаморфизмом	Стратоподобные и секущие тела сподулитов в верхних частях штоковидных, куполовидных или плитообразных массивов; надинтрузивные массивные и брекчевидные зоны трейзенизации, жилы; дайки онгонитов и ореолы метасоматитов вокруг; мощные слои пепловых туфов и туфобрекчий кальдерного комплекса	Лепидолит, циннвальдит, амблигонит, литиевый фенгит, вулканическое стекло, сподумен, литиевый мусковит	Sn, Ta, Cs, Rb, F, Be, Nb, W
Глинистый ⁵	Пеплосодержащие породы, накопленные в соленых озерах аридных областей с субаэральным преимущественно кремнекислым вулканизмом разной щелочности, но в основном субщелочным и щелочным, часто с образованием кальдер и иногда в сопровождении интрузий Li–F гранитов	Минерализованные слои или пластообразные зоны: пеплозалегающие глины, туфоалевролиты, боратоносные глины, туффиты, глины; минеральные подтипы: собственно глинистый и ядаритовый	Минералы группы смектита (монтмориллонит, сапонит, гекторит, свайнфордит), иллит, смектит–иллит, ядарит	B, K, Cs, Rb, Sr

Таблица 1. Окончание

Металлогенический тип	Вмещающие комплексы	Локализация рудных тел	Концентраты лития ¹	Другие полезные ископаемые ²
1	2	3	4	5
Саларный	Осадочные толщи сухих, сезонно пересыхающих и непересыхающих соленых озер на плато и в межторных впадинах современных геодинамически активных орогенных систем с аридным климатом, а также водные тела таких озер	Остаточная межзерновая рапа в осадках, реже – водные тела самих соленых озер; гидрохимические подтипы, определяющие технологию переработки: карбонатный, сульфатный натриевый, сульфатный магниевый, хлоридный	Рассолы	K, B, Mg, Na, Br
Геотермальный	Геотермальные рассолы в рифтовых зонах или предгорных прогибах, связанных с орогенными системами, геодинамически активными в настоящее время	Фонтанирующие из скважин геотермальные рассолы, циркулирующие в проницаемых зонах на различных глубинах (самая глубокая скважина – 5.5 км)	Рассолы	TE, Mg, Na
Нефтегазовых полей	Терригенно-карбонатные эвапоритоносные толщи нефтегазовых бассейнов древних платформ	Рассолы в преимущественно карбонатных доломитизированных породах с высокой проницаемостью	Рассолы	Br, Mg

¹ Перечислены в порядке частоты встречаемости промышленных концентратов в рудах: курсивом выделены минералы, которые никогда не определяют промышленную ценность месторождений без других минералов лития;

² а) уже извлекаемые или потенциально извлекаемые с оцененными ресурсами; б) F – флюорит, Na – в виде сульфата, карбоната и/или хлорида, TE – тепловая и электрическая энергия;

³ очень редкие случаи более высокой степени метаморфизма вмещающих пород и/или их принадлежность к иной фациальной серии связаны с наложением более позднего постпегматитового этапа деформации и метаморфизма (Гринбушес, Вайнебене);

⁴ по классификации минеральных типов редкометаллических пегматитов (Černý, Ercit, 2005), наиболее широко принятой специалистами всего мира (LCT – Lithium–Cesium–Tantalum); месторождения лития никогда не связаны с пегматитами типа NYF (Niobium–Yttrium–Fluor);

⁵ минерализацию с повышенными концентрациями лития в глинистых прослоях фанерозойских бокситов и углей Китая (Zhang et al., 2022) можно также рассматривать как подтипы глинистого типа, но их реальные промышленные перспективы пока не вполне ясны: в настоящее время такие объекты – предмет исследований их геологии и минералогии, а также лабораторных технологических работ.

Таблица 2. Сравнение суперконтинентальных циклов в металлогении лития по интегральным количественным параметрам

Пара- метры ¹	Циклы (возрастные границы, млрд лет)					Все циклы
	Кенорский (>2.25)	Колумбийский (1.35–2.25)	Родинийский (0.75–1.35)	Пангейский (0.19–0.75)	Амазийский (<0.19)	
Все типы месторождений						
N	37	13	2	36	76	164
Z	27131.1	6750.2	7240.0	27105.3	183771.2	251997.8
X	10.8	2.7	2.9	10.7	72.9	100
ZS	27131.1	6750.2	7240.0	27105.3	47822.9	116049.5
s	23.4	5.8	6.2	23.4	41.2	100
Пегматитовый тип (P)						
N	37	13	2	26	5	83
Z	27131.1	6750.2	7240.0	19820.4	5194.0	66135.7
z	733.3	519.2	3620.0	762.3	1038.8	796.8
X	10.8	2.7	2.9	7.8	2.1	26.3
x	41.0	10.2	10.9	30.0	7.9	100
s	23.4	5.8	6.2	17.1	4.5	57.0
Гранитный тип (G)						
N	—	—	—	10	10	20
Z	—	—	—	7284.9	6122.5	13407.4
z	—	—	—	728.5	612.3	670.4
X	—	—	—	2.9	2.4	5.3
x	—	—	—	54.3	45.7	100
s	—	—	—	6.3	5.3	11.6
Глинистый тип (C)						
N	—	—	—	—	16	16
Z	—	—	—	—	36506.4	36506.4
z	—	—	—	—	2281.7	2281.7
X	—	—	—	—	14.5	14.5
x	—	—	—	—	100	100
s	—	—	—	—	31.4	31.4
Саларный тип (S)						
N	—	—	—	—	28	28
Z	—	—	—	—	101806.3	101806.3
z	—	—	—	—	3635.9	3635.9
X	—	—	—	—	40.4	40.4
x	—	—	—	—	100	100
Геотермальный тип (GT)						
N	—	—	—	—	7	7
Z	—	—	—	—	15157.0	15157.0
z	—	—	—	—	2165.3	2165.3
X	—	—	—	—	6.0	6.0
x	—	—	—	—	100	100
Нефтегазовых полей тип (OG)						
N	—	—	—	—	10	10
Z	—	—	—	—	18985.0	18985.0
z	—	—	—	—	1898.5	1898.5
X	—	—	—	—	7.5	7.5
x	—	—	—	—	100	100

Примечание: ¹ N – количество месторождений в выборке; Z – суммарные оцененные ресурсы (тыс. тонн Li₂O); z – среднее количество ресурсов в одном месторождении (Z/N); X – доля в сумме ресурсов всей выборки (%); x – доля в суммарных ресурсах данного типа месторождений (%); ZS – сумма ресурсов месторождений с твердофазовыми рудами; s – доля в суммарных ресурсах месторождений с твердофазовыми рудами (%).

возможных для извлечения компонентов, минералах-концентраторах лития, а также ссылки на основные источники информации приведены в электронном приложении к данной статье на сайте журнала. Размещение этих месторождений на карте мира с идентификацией принадлежности к металлогеническому типу и суперконтинентальному циклу представлено на фиг. 1.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЛИТИЯ ПО СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНЫМ ЦИКЛАМ И ГЕОТЕКТОНИЧЕСКИМ СТРУКТУРАМ

Распределение известных на настоящий момент ресурсов лития в месторождениях разного возраста показано на оси геологического времени, разделенной на кластеры по 25 млн лет (фиг. 2). Для сравнительного анализа первичные данные объединялись по суперконтинентальным циклам, содержание которых определяется циклически повторяющимися в геологической истории процессами роста и деструкции земной коры, приводящими на определенных стадиях к формированию крупных континентальных масс, вплоть до суперконтинентов, а затем к их последующей дезинтеграции (Rogers, Santosh, 2004). Все это имеет определенные проявления в тектонике, магматизме, метаморфизме, седиментогенезе и металлогении (Ткачев, Рундквист, 2016; Bradley, 2011; Cawood et al., 2022; Hazen et al., 2014; Liu et al., 2019; Pesonen et al., 2021; Rogers, Santosh, 2004; Tkachev, 2011; и др.). Поэтому использование суперконтинентальных циклов для сравнительного анализа в исторической металлогении является естественным приемом, намного более прогрессивным, чем использование в этих целях современной геохронологической шкалы с нумерологическим принципом деления в докембрии и биостратиграфическим — в фанерозое.

Кенорский цикл (>2.25 млрд лет)

Этот древнейший цикл представлен месторождениями исключительно пегматитового типа. Самые ранние из известных в мире проявлений литиевой минерализации (сподумен, лепидолит, холмквистит, литиевый мусковит, эльбаит) выявлены в пегматитах комплекса Древних Гнейсов Свазиленда и гранит-зеленокаменного пояса Барбертон кратона Каапваль (Harris et al., 1995; Trumbull, 1995). Их возраст варьирует в интервале 2.99–3.08 млрд лет, т.е. отвечает середине

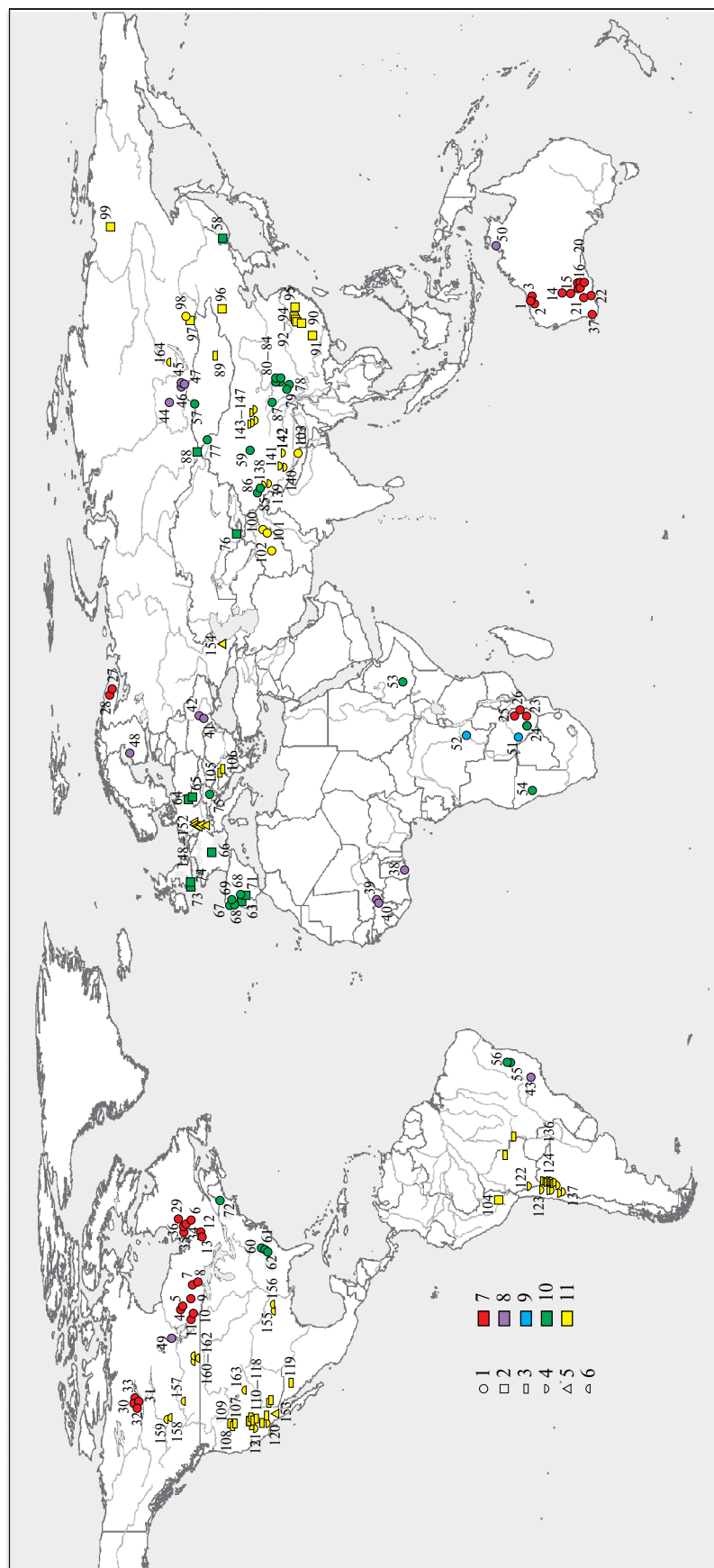
мезоархея (фиг. 2). Они не содержат промышленно интересных аккумуляций Li, Ta, Sn или Be, хотя минералы этих элементов там присутствуют в заметных количествах, о чем, в частности, свидетельствуют касситеритовые россыпи, которые отрабатывались вблизи некоторых из этих пегматитов в течение многих десятилетий (Trumbull, 1995). Несмотря на то что эти пегматиты не являются промышленными объектами, они все же имеют особенное значение для геологической истории Земли, т.к. являются маркерами начала в земной коре металлогенических процессов, связанных с редкометалльными пегматитами (Tkachev, 2011, McCauley, Bradley, 2014; Hazen et al., 2014; Grew et al., 2018).

Древнейшие пегматиты с гипогенными рудами редких металлов, включая литий, которые заинтересовали современную промышленность, образовались в конце мезоархея. В нашей выборке эта генерация (2.84–2.88 млрд лет) представлена тремя объектами (Пилгангура, Воджина, Арчер) в гранит-зеленокаменных поясах Восточного блока кратона Пилбара (фиг. 1; фиг. 2; Электронное приложение*).

Неоархейские месторождения лития намного многочисленнее мезоархейских, и география их распространения гораздо шире. В гранит-зеленокаменно-сланцевых поясах кратона Сьюпериор установлены две возрастные генерации литиеносных пегматитов: 2.64–2.67 млрд лет (Моблан, Пэйкагама, Лакорн и др.) и 2.58–2.62 млрд лет (Корветт, Вабуши и др.). В аналогичных структурах кратона Йилгарн также установлено два поколения месторождений данного типа: большинство из них имеют возраст в интервале 2.63–2.64 млрд лет (Кэтлин-Вэлли, Маунт-Мэрион, Эрл-Грей и др.), и только Гринбушес на юго-западе кратона — 2.53 млрд лет. В структурах кратонов Зимбабве (Бикита, Зулу, Аркадия) и Кольско-го (Колмозерское, Полмостундровское) литиеносные пегматиты сформировались в интервале 2.60–2.62 млрд лет. Время образования месторождений кратона Слейв (Хиден-Лэйк, Тор и др.) приходится на интервал 2.56–2.59 млрд лет (фиг. 1; фиг. 2; Электронное приложение). Всего в 37 месторождениях кенорского цикла сосредоточено 10.8% ресурсов анализируемой выборки (фиг. 2, табл. 2).

Существование в конце архея — начале палеопротерозоя единого суперконтинента Кенорленд (Rogers, Santosh, 2004) в настоящее время

*Дополнительные материалы размещены в электронном виде по адресу: <https://doi.org/10.31857/S0016777024060037>



Фиг. 1. Месторождения лития, вошедшие в анализируемую выборку. Условные обозначения: 1 – пегматитовый, 2 – гранитный, 3 – глинистый, 4 – саларный, 5 – геотермальный, 6 – нефтегазовых полей; 7–11 – суперконтинентальные циклы: 7 – пермский, 8 – камбийский, 9 – родинийский, 10 – пангейский, 11 – амазийский. Месторождения: 1 Пилгангура, 2 Воджина, 3 Арчер, 4 Пэйкама, 5 Спарк, 6 Мобан, 7 Сеймур-Лэйк, 8 Нама-Крик, 9 Рут-Бэй, 10 Сепарейшн-Рэпилз, 11 Танко, 12 Лакорн, 13 Отье, 14 Кэглин-Вэлли, 15 Маунт-Айда, 16 Анна, 17 Болд-Хилл, 18 Манна, 19 Маунт-Мэрион, 20 Пионердоум-Норт, 21 Эрл-Грей, 22 Маунт-Кэтлин, 23 Бикита, 24 Зулу, 25 Аркадия, 26 Саби-Стар, 27 Колмозерское, 28 Полмостундровское, 29 Корветт CV5, 30 Хиден-Лэйк, 31 Рид-Лэйк – Хардинг-Лэйк, 32 Бигхилл-Лэйк, 33 Тор, 34 Вабуши, 35 Джеймс-Бэй, 36 Роуз, 37 Гринбушес, 38 Эвоя, 39 Бугуни, 40 Гуламина, 41 Надия–Станковатское, 42 Полоховское, 43 Вольт-Гранде, 44 Вишняковское, 45 Белореченское, 46 Голышовое, 47 Уриковское, 48 Раласаарет-Оутовеси, 49 Векско-Лэйк, 50 Финнисс, 51 Камативи, 52 Манано-Китотоло, 53 Кентича, 54 Юис, 55 Итинга, 56 Калина, 57 Тастыгское, 58 Вознесенское, 59 Тотайлэкэ, 60 Черривилль, 61 Холлман-Бим, 62 Кингз-Маунтин, 63 Архемела, 64 Залисдорф, 65 Циновец – Циннвалд, 66 Эшассьер, 67 Альберга, 68 Барросу, 69 Сепела, 70 Лас-Навас, 71 Вальдефлорес, 72 Пламбаго-Норт, 73 Трелавур, 74 Ганхис, 75 Вайнебене, 76 Шавазсай, 77 Коктогай, 78 Цзянцзика, 79 Мужун, 80 Лицзягоу, 81 Елун-гоу, 82 Сэцэмузу, 83 Даньба, 84 Цзяда, 85 Байлуншань, 86 Сюэфэнлин, 87 Чжаулуан, 88 Алахинское, 89 Хухдел, 90 Ичунь, 91 Чжэнчун, 92 Дантянь, 93 Сикэн, 94 Даган, 95 Суншуган, 96 Вэйласыто, 97 Орловское, 98 Завитинское, 99 Кестер, 100 Парун, 101 Шамакат, 102 Тагавлор, 103 Цюнцзяган, 104 Фальчани, 105 Ялар, 106 Валево, 107 Лакер-Пасс, 108 Кингс-Вэлли, 109 Маклермитт-Норт, 110 Тонота, 111 Риолит-Ридж, 112 Зевс, 113 Клэйтон-Вэлли, 114 Макджи, 115 Бонни-Клэр, 116 Форт-Кэйди, 117 Биг-Сэнди, 118 Бэйсин, 119 Сонора, 120 Силвер-Пик, 121 Серлз-Лейк, 122 Салар-де-Уюни, 123 Салар-де-Атакама, 124 Салар-де-Оларес, 125 Салар-де-Каучари, 126 Салар-дель-Ринкон, 127 Пастос-Грандес, 128 Салар-де-Посуэло, 129 Салар-де-Льюльяльяхо, 130 Сентенарио-Ратонес, 131 Салар-де-Рио-Гранде, 132 Саль-де-Лос-Анхелес, 133 Салар-дель-Омбре-Муэрто, 134 Канделас, 135 Качи, 136 Салар-де-Марикунга, 137 Трес-Кебралас, 138 Кушуй, 139 Лунмуло, 140 Цзабуе, 141 Лагоцо, 142 Дансюнцо, 143 Илипин, 144 Си-Тайцзинайэр, 145 Дун-Тайцзинайэр, 146 Чэрхань, 147 Дачайдань, 148 Ортеана, 149 Инсхайм–Ландау, 150 Таро–Кернер, 151 Флаггентурм, 152 Мангейм–Терезе, 153 Солтон-Си, 154 Тарумовское, 155 Смэкоувер-Ланзесс, 156 Смэкоувер-Тетра, 157 Башо, 158 Бордвок, 159 Пис-Ривер, 160 Прэари, 161 Мансур, 162 Вьюфилд, 163 Парадокс, 164 Ковыктинское.

активно обсуждается и многими специалистами оспаривается. В качестве альтернативы, лучше согласующейся с современными палеомагнитными и геологическими данными, выдвигается концепция суперкратонов — очень крупных континентальных массивов, консолидировавшихся в разные периоды с середины мезоархея до конца неархея и остававшихся на большей своей части стабильными к началу палеопротерозоя: Ваальбара, Сюперия, Зимгарн и Склавия/Нунавутия (Pesonen et al., 2021; Salminen et al., 2021; и ссылки там). Если это так, то все литиеносные

пегматитовые месторождения кенорского цикла образовались не на разных стадиях сборки единого суперконтинента, как ранее предполагалось (Tkachev, 2011), а возникали в посторогенные фазы становления нескольких архейских суперкратонов. Последние формировались в результате объединения сиалических блоков, сложенных преимущественно серогнейсовыми комплексами, посредством их сшивания гранит-зеленокаменными и гранит-зеленокаменно-сланцевыми поясами — главными аккреционно-коллизонными структурами той эпохи (Pesonen et al.,



Фиг. 2. Распределение ресурсов месторождений лития разных типов на оси геологического времени, разделенной на сегменты суперконтинентальных циклов. Интервал 0–25 млн лет удвоен по длине: в левой его части показаны ресурсы месторождений с твердыми рудами, в правой — ресурсы месторождений рассолов. Числа под названиями циклов: в числителе — доля месторождений соответствующего цикла в суммарных ресурсах всей выборки (%), в знаменателе — количество месторождений. Условные обозначения типов месторождений: 1 — пегматитовый, 2 — гранитный, 3 — глинистый, 4 — геотермальный, 5 — нефтегазовых полей, 6 — саларный.

2021; Salminen et al., 2021). Все рудоносные пегматитовые поля локализованы в пределах или ближайшем обрамлении именно этих структур.

Пегматитовые месторождения лития ($\pm$ Ta, Sn, Be, Cs, Rb, Nb) установлены во всех перечисленных суперкратонах. Если суммировать данные о ресурсах, учтенных в нашей выборке, то окажется, что 45.5% из них сосредоточено в месторождениях, связанных с консолидацией суперкратона Зимгарн. Статистика других суперкратонов: 24.2% – Ваальбара, 28.1% – Сюперия, 2.2% – Склавия. На структуры последнего суперкратона приходится наименьшие объемы геологоразведочных работ на литий в течение последнего полувека. Не исключено, что именно этим, хотя бы отчасти, объясняется столь малая доля Склавии в общем балансе ресурсов кенорского суперконтинентального или, с большей вероятностью, суперкратонного цикла.

Колумбийский цикл (1.35–2.25 млрд лет)

Второй по древности цикл также представлен в металлогении лития только пегматитовым типом (фиг. 1; фиг. 2). Имеющиеся геологические и геохронологические данные (Электронное приложение) указывают на то, что все месторождения цикла из анализируемой выборки образовались в орогенах среднего и позднего палеопротерозоя: в Эбурнейском поясе (Эвоая, Гуламина, Бугуни) их возраст близок к 2.09 млрд лет, Кировоградском (Полоховское, Надия-Станковатское) и Риу-дас-Мортес (Вольта-Гранде) – 2.03 млрд лет, Восточно-Саянском (Вишняковское, Гольцовое и др.) – 1.83–1.84 млрд лет, Свекофеннском (Рапасаарет-Оутовеси) и Трансгудзонском (Векуско-Лэйк) – 1.78–1.79 млрд лет, Пайн-Крик (Финнисс) – 1.73 млрд лет.

Согласно недавним палеорекострукциям, суперконтинент Колумбия (или Нуна – оба названия равноупотребимы в литературе) завершил свое формирование около 1.6 млрд лет назад (Elming et al., 2021; Li Z. et al., 2023). Все месторождения в выборке заметно старше этого возраста, т.е. они образовались не на финальной стадии консолидации суперконтинента, а в орогенах, спаивших промежуточные континенты. Такими континентами были: Атлантика (пояса Эбурнейский и Риу-дас-Мортес – 56.7% от ресурсов месторождений цикла в выборке), Сарматия (Кировоградский – 15.6%), Сибирь (Восточно-Саянский – 20.6%), Фенноскандия (Свекофеннский – 1.8%), Лаврентия (Трансгудзонский – 1.8%) и Протоавстралия (Пайн-Крик – 3.5%). В данном цикле, в отличие от кенорского, имеется явная тенденция

к снижению продуктивности от ранних орогенических эпох к поздним (фиг. 2).

Колумбийский цикл в целом менее продуктивен на фоне всех прочих циклов: 13 месторождений заключают в себе только 2.7% ресурсов всей анализируемой выборки (табл. 2). По данному показателю он уступает остальным циклам, даже если исключить из сравнения месторождения в рассолах. И только по количеству месторождений он превосходит следующий родинийский цикл.

Родинийский цикл (0.75–1.35 млрд лет)

По типовому однообразию месторождений лития этот суперконтинентальный цикл идентичен кенорскому и колумбийскому (фиг. 1; фиг. 2; Электронное приложение). При этом он уступает всем циклам по общему количеству объектов в выборке: их всего два. Литиеносные пегматиты этого отрезка геологической эволюции локализованы в гренвилидах Центральной Африки: Камативи (1.04 млрд лет) в раннедокембрийском блоке Дете-Камативи, активизированном в конце мезопротерозоя при формировании Ирумидского пояса, и Манано-Китотоло (0.95) в Кибарском поясе (фиг. 1). Оба орогенных пояса возникли в одном регионе формировавшегося у границы мезопротерозоя и неопротерозоя суперконтинента Родиния. Здесь имела место двухэтапная коллизия нескольких древних континентов и микроконтинентов: Конго, Калахари, Танзания–Бангвеулу, Лурио (Li et al., 2008).

В данном цикле удивляет тот факт, что пока не известно не только месторождений, но даже и проявлений литиеносных пегматитов в его самом протяженном коллизионном поясе, который позднее был фрагментирован и сейчас представлен гренвилидами древних континентальных блоков Лаврентия, Балтика, Амазония и Рио-де-ла-Плата.

На данный момент по количеству ресурсов (2.9% от всей выборки) этот цикл немного превосходит только предшествующий колумбийский. Перспективы увеличения как дополнительных ресурсов, так и количества крупных месторождений лития родинийского цикла существуют. Однако они, по-видимому, ограничены все теми же Кибарским и Ирумидским поясами, а также поясом Намаква, где уже известно несколько мелких до средних по масштабу месторождений. Пояс Намаква был сформирован в обрамлении кратона Калахари при его коллизии с несколькими микроконтинентами (Li et al., 2008).

*Пангейский цикл (0.19–0.75 млрд лет)**Пегматитовый тип*

Этот цикл – древнейший, в котором месторождения лития представлены больше, чем одним типом: к пегматитовому добавился гранитный. Тем не менее накопление основной доли ресурсов в нем (73.1% в цикле или 7.8% от всей выборки) снова предопределили пегматиты (фиг. 2, табл. 2). Их месторождения, включенные в выборку, локализованы в орогенных поясах от раннепалеозойского до раннемезозойского возраста (млрд лет): Восточно-Африканском (Кентича) – 0.53, в Дамарском (Юис) и Арасуай (Итинга, Колина) – 0.50, в Южно-Сангиленском (Тастыгское) – 0.48, в поясе Алтынтаг (Тогайлэкэ) – 0.47, в Аппалачском – 0.35 и 0.30 (Кингз-Маунтин и др. и Пламбаго-Норт, соответственно), в Центрально-Иберийской зоне Варисцийского (Барросу и др.) – 0.31, в блоке Коралпе – фрагменте Варисцийского пояса, захваченного много позже Альпийским орогеном (Вайнебене) – 0.27, в Алтайском поясе (Коктогай) – 0.22, в поясах Сонпань-Ганьцзэ (Цзяцзика, Елунгоу, Данба и др.) и Западно-Кунылуньском (Байлуншань, Сюэфэнлин) – крупных сегментах Центрально-Китайского орогена – 0.20–0.21 (фиг. 1; Электронное приложение).

Из данных по возрастам этих месторождений следует, что они формировались импульсами на протяжении около 330 млн лет на разных стадиях поэтапной сборки Пангеи. Ранние импульсы имели место в орогенах, спаявших в кембрии (0.50–0.53 млрд лет) мегаконтинент Гондвана, а в ордовике (0.47–0.48 млрд лет) – Тувино-Монгольский и Тарим-Цайдамский миниконтиненты, включенные позднее в Центрально-Азиатский орогенный пояс (Domeier, 2018; Torsvik et al., 2021). Оцененные в них ресурсы составляют 17.6 и 3.9% от суммарных ресурсов в анализируемой выборке пегматитовых месторождений пангейского цикла. Месторождения периода 0.27–0.36 млрд лет (18.9% ресурсов) возникли в главную фазу формирования Пангеи в результате слияния Гондваны и Лавруссии (Torsvik et al., 2021). Наконец, импульс 0.20–0.22 млрд лет обусловлен завершающей фазой конфигурирования Пангеи, когда она приросла Восточно-Азиатским сегментом. Это событие сопровождалось обширным пегматитообразованием в Центрально-Китайском поясе и намного более локальным аналогичным процессом в уже стабилизированном к тому времени Алтайском сегменте Центрально-Азиатского пояса (Tang et

al., 2023). В выборке пегматитовых месторождений данного цикла с этим импульсом связано максимальное количество ресурсов (59.6%).

Гранитный тип

В пангейском цикле впервые появляются Li–F плюмазитовые граниты, представляющие практический интерес для добычи лития (фиг. 1; фиг. 2; табл. 2; Электронное приложение). Этот тип месторождений по внутрикоровому происхождению материнских магм, локализацией в орогенных поясах, минеральному и валовому химическому составу, в том числе и для элементов, определяющих рудоносность, имеет значительное сходство с редкометалльными пегматитами. Однако между ними есть и различия. Они проявлены в разном диапазоне регионального метаморфизма вмещающих пород, в морфологии пегматитов и интрузий Li–F гранитов, в формировании последних не только в коллизионных орогенах, но и в орогенах активных континентальных окраин. Кроме того, в разведанных ресурсах многих месторождений, связанных с Li–F гранитами, заметную роль, вплоть до исключительной, играет не только внутри-интрузивная минерализация, но и надинтрузивные грейзены и кварцевожильные системы. Структурно-текстурные особенности рудоносных зон также заметно отличают гранитный тип от пегматитового и дают основания для его выделения в классификации месторождений редких металлов (Солодов, 1980; Beus, 1982; Linnen, Cuneu, 2005).

Древнейшие проявления литиевой минерализации в виде слюд в связи с редкометалльными гранитами, возможно, формировались уже в колумбийском цикле (Beus, 1982) и, вне всякого сомнения, в родинийском цикле (Makutu et al., 2023, и ссылки там). Однако промышленные аккумуляции лития в них пока не установлены.

В выборке пангейского цикла 10 месторождений литиеносных руд данного типа. Их доля в суммарных ресурсах всей выборки составляет 2.9%. Самое древнее из них, Вознесенское (0.48 млрд лет), находится в Ханкайском блоке. Самая многочисленная популяция таких месторождений сформировалась в конце палеозоя в разных зонах Варисцийского пояса: Центрально-Иберийской (Архемела, Вальдефлорес), Центральном массиве (Эшассьер), Саксо-Тюрингской (Циновец–Циннвальд, Задисдорф) и Рено-Герцинской (Трелавур, Ганхис) (фиг. 1). Возраст большинства из них определен в интервале 0.31–0.32 млрд лет, а для месторождений Трелавур и Ганхис – 0.28 млрд лет. Месторождения

Шавазсай (0.26 млрд лет) в Тянь-Шаньском поясе и Алахинское (0.20 млрд лет) в Алтайском поясе — самые молодые в этом цикле (фиг. 2; Электронное приложение).

В месторождениях Вознесенском, Архемела, Вальдефлорес и Шавазсай оцененные руды находятся только в надинтрузивной зоне. Рудные тела в Задисдорфе есть и в верхней части гранитного тела и над ним. В остальных случаях все ресурсы сосредоточены в верхней части массивов Li—F гранитов. Алахинское месторождение выделяется на общем фоне своего типа: оно единственное, в котором основной баланс лития обеспечивается породообразующим сподуменом (Annikova et al., 2016), что намного более типично для пегматитов (табл. 1; Электронное приложение). Шавазсай — единственный объект во всей выборке с разведанными запасами литиевых руд, образование которых связано с внедрением тел онгонитов — субвулканических аналогов редко-металльных гранитов (Мамарозиков и др., 2012).

Таким образом, с ранней стадией пангейского цикла, отмеченной и в пегматитовом типе, связано только одно месторождение гранитного типа — Вознесенское, которое имеет наименьшую долю в общих ресурсах цикла (1.6%). Оно сформировалось в орогенном поясе Куунга—Пиньяра при консолидации мегаконтинента Гондвана, но в начале девона содержащий это месторождение блок Бурей—Цзямусы—Ханка откололся и долго мигрировал на север вплоть до рубежа триаса и юры, когда присоединился к практически уже сформированной Пангее (Yang et al., 2023).

Варисцийский пояс, спаявший в составе Пангеи мегаконтиненты Гондвана и Лавруссия (Torsvik et al., 2021), является самым продуктивным как по количеству месторождений (7), так и по их доле в суммарных ресурсах гранитного типа в пангейском цикле (90.5%). Месторождение Шавазсай (1.7%) возникло при консолидации Центрально-Азиатского орогенного сегмента Пангеи, а Алахинское (6.2%) — при активизации этого сегмента тектоническими процессами, связанными с финальной коллизией на Восточно-Азиатском фланге суперконтинента (Tang et al., 2023).

Амазийский цикл (<0.19 млрд лет)

Самый молодой суперконтинентальный цикл имеет особенности, которые затрудняют его по-настоящему корректное сравнение с остальными суперконтинентальными циклами.

Во-первых, в отличие от более ранних уже завершенных циклов, он еще далек от главных событий грядущих фаз становления суперконтинента, т.е. является неполным (Duarte et al., 2018). Во-вторых, сейчас доступны ресурсы лития в месторождениях, полные аналоги которых с большой вероятностью существовали и прежде, но не могли в принципе сохраниться из-за жидкого состояния литиеносной субстанции и относительной по геологическим меркам краткости благоприятных условий для их существования в данном конкретном регионе. Прежде всего, это относится к месторождениям в сalaraх и геотермальных рассолах, сроки существования которых, в лучших случаях, исчисляются 1–2 десятками миллионов лет. Например, все известные на настоящий момент месторождения сalarного типа возникли, согласно геологическим данным о возрастах вмещающих формаций, не раньше среднего неогена. В-третьих, все месторождения нефтегазовых полей, также представленные рассолами, но иного происхождения, чем в сalaraх и геотермах (табл. 1), рассмотрены среди амазийских. Между тем, очень вероятно, что часть из них изначально возникли не в позднем кайнозое, как это представлено на фиг. 2, а имеют очень растянутую в геологическом времени историю формирования, начинающуюся еще в палеозое или мезозое и продолжившуюся и в более позднее время (Huff, 2016). При этом авторам не известны объективные данные, позволяющие, как в случае с рудными месторождениями, более точно оценить время их возникновения в местах современной локализации. Кроме того, высокая миграционная способность гидрогеологических рассольных систем, откликаясь даже на небольшие тектонические подвижки во вмещающих блоках пород, дает основание предположить, что процесс формирования таких рассолов в некоторой степени продолжается и сейчас (Huff, 2016). Следовательно, мы можем рассматривать их как недавние при тех параметрах, что были определены во время проведения геологоразведочных работ. Этот подход и реализован в данной работе.

Приняв сделанные выше допущения, можно утверждать, что амазийский цикл является единственным, в котором металлогения лития представлена всеми типами месторождений с доказанной экономической привлекательностью и потому анализируемыми в нашем исследовании.

Пегматитовый тип

Пегматитовые месторождения с используемым в исследовании лимитом ресурсов являются в амазийском цикле самой малочисленной группой — их только пять. Они выявлены в двух орогенных поясах (фиг. 1; Электронное приложение): Монголо-Охотском (Завитинское, 0.13 млрд лет) и Гиндукуш—Гималайском (Цюнцзяган, Парун и др. — все 0.03 млрд лет). Оба пояса возникли при формировании современного континента Евразия: первый — при завершении коллизии основного тела континента с Амурско-Китайским мегаблоком, второй — вследствие присоединения Индии, отколовшегося фрагмента бывшей Гондваны (Deng et al., 2017; Zhou, Su, 2019). Доля типа в сумме ресурсов, относимых к амазийскому циклу, составляет только 2.8% или 2.1% от всей выборки.

Гранитный тип

Таких месторождений в выборке в амазийском цикле вдвое больше, чем пегматитовых (табл. 2), но их доля в разведанных ресурсах всех месторождений, относимых к этому циклу, не намного выше — 3.3% (2.4% от всей выборки). География их распространения также несколько шире, чем у пегматитовых. Самая многочисленная группа (Ичунь, Суншуган и др.) формировавшаяся в период 0.13—0.16 млрд лет, установлена в Южно-Китайском поясе (фиг. 1). В этом же промежутке (0.14 млрд лет) возникли месторождения Орловское и Вэйласыто в Монголо-Охотском и Большехинганском поясах, соответственно. Немного позже (0.12 млрд лет) образовалось месторождение Кестер в Верхоянском поясе. Самое молодое в этом ряду месторождение Фальчани (0.01 млрд лет) в Андийском поясе значительно отличается от остальных представителей своего типа: его руды представлены витрокластическими туфами и туфобрекчиями с онгонитовым химическим составом (Riordan et al., 2020). Таким образом, оно логически завершает фациальный ряд подтипов данного типа: редкометалльные граниты — онгониты — онгонитовые туфы и брекчии.

Все месторождения гранитного типа амазийского цикла формировались в орогенах, но в отличие от пангейского цикла, в основном в тыловых зонах активных континентальных окраин, а не в постколлизиионной обстановке (Deng et al., 2017). Только месторождения Орловское и Кестер, как и их аналоги пангейского цикла, связаны с постколлизиионным магматизмом (Абушкевич, Сырицо, 2007; Прокопьев и др., 2018).

Глинистый тип

Амазийский цикл пока является единственным, в котором к настоящему моменту установлены месторождения глинистого типа с характеристиками, подходящими для промышленного освоения в современных условиях (табл. 1; фиг. 1). В нашей выборке древнейшим месторождением данного типа (0.15 млрд лет) является Хух-Дел в Центрально-Азиатском орогенном поясе. Оно локализовано в межгорной депрессии с вулканогенно-осадочным разрезом заполняющих ее пород. Вулканизм имел место на территории, разделявшей Монголо-Охотский и Яньшаньский орогены в посторогеническую фазу их становления (Dong et al., 2018). Судя по тому, что в этой же провинции выявлены и другие проявления литиевой минерализации глинистого типа с аналогичными условиями залегания рудных тел (Li et al., 2021), можно предположить, что рудообразующие процессы в ней происходили во многих местах приблизительно в одно время.

Множественность проявлений литиевой минерализации характерна и для двух других провинций, где к настоящему времени выявлены экономически привлекательные месторождения данного типа: миоценовой в Вардарской зоне Балкан (Ядар, Валево) и миоцен-плейстоценовой в провинции Бассейнов и Хребтов Северной Америки (Такер-Пасс, Риолит-Ридж, Сонора и др. — см. фиг. 1).

Почти на всех месторождениях данного типа литий связан с глинистыми минералами в виде сорбированного катиона, реже и меньше — в виде катиона, входящего в кристаллическую структуру этих минералов (табл. 1). Только на месторождении Ядар концентратом лития является ядарит — боросиликат лития, который был именно здесь открыт и пока нигде в мире вне этого региона не найден.

Месторождения на Балканах, как и юрский Хух-Дел, возникли в тектонических депрессиях на постколлизиионной стадии развития своих регионов (Borojević Šoštarić, Brenko, 2023; Dong et al., 2018). Процессы рудообразования в самой продуктивной для глинистого типа в провинции Бассейнов и Хребтов (13 месторождений) протекали не в постколлизиионной обстановке, а в тылу надсубдукционной части активной континентальной окраины, имеющей также проявления вулканизма над горячей точкой (Benson et al., 2023; Castor, Henry, 2020; Coffey et al., 2021). И именно в этой провинции наиболее ярко проявлена связь почти всех месторождений

с депрессиями, локализованными рядом с кальдерными структурами, вплоть до залегания внутри них (Castor, Henry, 2020; Coffey et al., 2021).

Саларный тип

Экономически интересные месторождения этого типа установлены только в трех провинциях: Бассейнов и Хребтов, Альтиплано и Тибетской (фиг. 1). Все они находятся в тыловых зонах современных орогенных систем: окраинно-континентальной (первые две) и коллизионной (последняя). Обязательной характеристикой таких провинций является также и аридный климат. Как показал анализ, проведенный с участием одного из авторов, указанные тектонические режимы создают предпосылки для поступления в приповерхностный слой значительных объемов лития и других сопутствующих компонентов с магматическими породами и флюидами на протяжении достаточно длительного периода, а аридный климат способствует их многоэтапному концентрированию в рассолах саларов (Романюк, Ткачев, 2010; Munk et al., 2016). Эти бессточные озера ежегодно частично или полностью пересыхают в сухой сезон, а иногда имеют сухую поверхность и круглогодично. Основным интерес обычно представляют рассолы, находящиеся в поровом пространстве их донных отложений, состоящих из эвапоритов и обломочных пород. Именно этим рассолам свойственны максимальные концентрации лития при минимальных сезонных колебаниях. Все месторождения очень молодые: известные сейчас литиеносные озера в американских провинциях возникли не раньше миоцена, а в китайской — не раньше плиоцена, но вероятнее всего — в плейстоцене (Романюк, Ткачев, 2010 и ссылки там).

Из 28 месторождений выборки в саларах 16 находятся в провинции Альтиплано (фиг. 1). Ее часто именуют Литиевым треугольником: 79.7% суммарных ресурсов этого типа или 32.2% от суммы всех ресурсов в анализируемой выборке выявлены именно здесь, что делает ее крупнейшей в мире литиеносной провинцией. Тибетская провинция представлена 10 объектами, имеющими долю 19.8% от ресурсов своего типа. В провинции Бассейнов и Хребтов только 2 месторождения с очень небольшой долей 0.5%.

Геотермальный тип

Месторождения глубоко циркулирующих геотермальных рассолов — не самый массовый, но уже вполне привычный в ряде стран источник тепловой и электрической энергии. В некоторых

из этих геотермальных систем установлены повышенные концентрации лития, которые представляют дополнительный практический интерес. Количество таких месторождений, где геологоразведочными работами определены экономически привлекательные ресурсы лития пока еще невелико: удалось собрать сведения только для семи (фиг. 1; Электронное приложение). Все они локализованы в депрессионных структурах с активной неотектоникой, возникших в связи с формированием современных орогенных систем: коллизионными Альпийской (Ортену и др. в Верхнерейнском рифте) и Кавказской (Тарумовское на востоке Предкавказского прогиба), а также окраинно-континентальной Кордильерской (Солтон-Си в одноименном трое в зоне разлома Сан-Андреас) (Юдин, 2008; Brothers et al., 2009; Dèzes et al., 2004). Доля разведанных ресурсов лития в этих месторождениях составляет 6.0% от всех ресурсов выборки или 11.2% от ресурсов в месторождениях всех рассольных типов (табл. 2).

Нефтегазовых полей тип

Из всех рассматриваемых типов месторождений этот тип — единственный, представители которого локализованы не в орогенных структурах, а в осадочных чехлах древних платформ (табл. 1). С наибольшей вероятностью основой таких месторождений стали захороненные эвапоритизированные морские воды, диагенные растворы, меньше — метеорные воды (Alexeev et al., 2020; Huff, 2016; и ссылки там). Смешиваясь, они формировали рассолы, которые могли многократно и длительно обогащаться как в отношении состава растворенных элементов, так и их концентраций, мигрируя во вмещающих породах, представленных эвапоритовыми и терригенными формациями. К настоящему времени 99% всех разведанных ресурсов данного типа сосредоточены в месторождениях четырех осадочных бассейнов Северо-Американской платформы: Западно-Канадском, Уиллистон, Парадокс и Арканзас-Стейтлайн (фиг. 1). Остаток приходится на Ковыктинское месторождение Ангаро-Ленского бассейна Сибирской платформы. Однако общий прогнозный потенциал Сибирской платформы практически не уступает ресурсам Северо-Американской платформы (Alexeev et al., 2020). По аналогии можно ожидать наличие подобных рассолов в нефтегазовых бассейнах древних платформ Африки и Южной Америки, но авторам не известны такие данные. В сумме доля месторождений этого типа оставляет 7.4% в общем разведанном балансе и 10.2% в амазийском цикле (табл. 2).

СТЕПЕНЬ ПРОМЫШЛЕННОГО ОСВОЕНИЯ И КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЙ РАЗНЫХ ТИПОВ И ЦИКЛОВ

Пегматитовый тип

Выше было указано, что в последние годы месторождения с твердыми рудами вновь вернули себе первенство в объеме производства после многолетнего периода, когда лидировал саларный тип. При этом самую главную роль в добыче лития играют именно пегматитовые месторождения: они обеспечивают не менее 90% производства литиевых продуктов, получаемых из твердых руд.

Из 37 пегматитовых месторождений выборки *кенорского цикла* 12 активно эксплуатируются с извлечением лития, являющегося в них главным или, реже, одним из главных компонентов (Электронное приложение). Только два рудника (Бикита, Гринбушес) служат этой цели почти непрерывно на протяжении нескольких десятилетий, на двух месторождениях (Танко, Лакорн) добыча литиевых руд была недавно возобновлена после долгого перерыва, а остальные восемь (Пилгангура, Маунт-Мэрион, Зулу и др.) стали промышленным источником этого элемента только в последнее десятилетие. Еще три месторождения, Сепарейшн-Рэпидз, Кэтлин-Вэлли и Саби-Стар, обустраиваются для начала добычи в ближайшие пару лет.

Суммарные ресурсы этих рудников в стадии эксплуатации и предэксплуатации превышают 70% от всех оцененных ресурсов кенорского цикла (табл. 3). Средневзвешенное содержание Li_2O в их рудах (1.46%) немного выше среднего по циклу (1.42%) и заметно превышает аналогичный показатель в пока неэксплуатируемых месторождениях (1.27%). Это свидетельствует о первоочередном интересе горнорудных компаний к объектам с крупными ресурсами и, по возможности, с более высокими содержаниями лития. Однако и к неэксплуатируемым еще месторождениям кенорского цикла проявляется большой интерес: почти на всех из них в последние годы велись геологоразведочные работы. В полной мере это относится и к двум российским месторождениям архейского возраста, Колмозерскому и Полмостундровскому, где сейчас проводится дополнительное разведочное бурение, предварительные результаты которого позволяют предполагать увеличение и ранее

подсчитанных запасов, и средних содержаний лития в них.

Из всех месторождений *колумбийского цикла* длительный период эксплуатируется только Вольта-Гранде. Многие годы главным компонентом добываемых руд был Та с попутными Sn и Nb. Однако в последнее десятилетие среди извлекаемых компонентов появился Li, и на него сразу был смещен основной экономический акцент. В 2023 г. была произведена первая промышленная партия сподуменового концентрата на руднике Грантс в проекте Финнисс. В активной предэксплуатационной стадии находятся Гуламина (42.9% ресурсов в выборке цикла при самом высоком среднем содержании Li_2O в ней – 1.37%) и Рапасаарет-Оутовеси (лучшие инфраструктурные условия для эксплуатации). В целом, ресурсы этих четырех предприятий составляют более половины всех оцененных ресурсов колумбийского цикла при среднем содержании 1.33%, что немного выше среднего значения по циклу (табл. 3). Таким образом, как и в кенорском цикле, здесь прослеживается тенденция (но не правило) к первоочередному освоению более крупных и богатых месторождений.

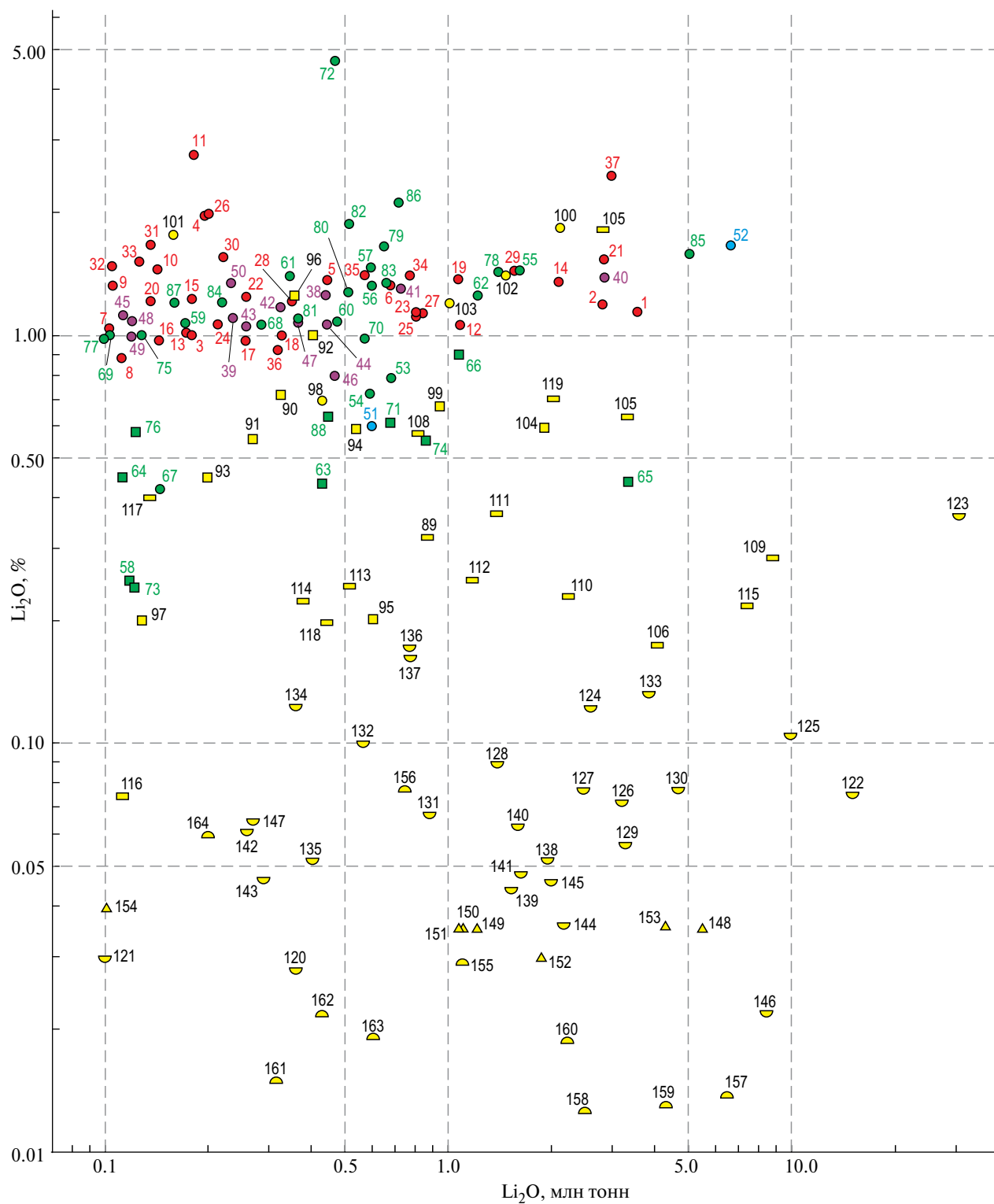
Активные буровые работы в последние годы также велись на Эвоая, Бугуни, Векуско-Лэйк. Остальные месторождения были разведаны еще в прошлом веке, но по разным причинам пока не имеют инвесторов для продолжения работ.

Российские месторождения Восточно-Саянской провинции имеют средние содержания лития в рудах немного ниже среднего значения этого параметра как для типа в данном цикле, так и средних значений для архейских месторождений Кольской провинции, намечаемых к освоению в ближайшие годы (фиг. 3; табл. 3). Также они проигрывают последним и в инфраструктурном аспекте. Тем не менее, по качественным и количественным характеристикам руд они не уступают, например, эксплуатируемому месторождению Вольта-Гранде или подготавливаемому к освоению месторождению Рапасаарет-Оутовеси. Поэтому, если внутренний спрос на литий в России будет быстро увеличиваться, то не исключено появление практического интереса и к месторождениям Восточно-Саянской провинции. Прежде всего, это относится к месторождениям Гольцовое, Белореченское и Урикское в ее юго-восточной части, т.к. они содержат основные ресурсы в пегматитовых телах, выходящих на поверхность. На Вишняковском месторождении на северо-западе провинции (фиг. 3)

Таблица 3. Сравнение средних качественных параметров руд месторождений лития в разных типах и супер-континентальных циклах

Пара- метры ¹	Циклы					Все циклы
	Кенорский (>2.25)	Колумбийский (1.35–2.25)	Родинийский (0.75–1.35)	Пангейский (0.19–0.75)	Амазийский (<0.19)	
Пегматитовый тип (P)						
C	<u>0.88–2.76</u> 1.42	<u>0.79–1.37</u> 1.23	<u>0.60–1.65</u> 1.56	<u>0.42–4.68</u> 1.37 ²	<u>0.71–1.83</u> 1.49	<u>0.42–4.68</u> 1.44
E	15 / 71.3	4 / 52.0	–	10 / 45.2	1 / 8.3	30 / 48.6
C _E	<u>0.97–2.45</u> 1.46	<u>1.05–1.37</u> 1.33	–	<u>0.73–1.48</u> 1.29	<u>0.71</u> 0.71	<u>0.71–2.45</u> 1.40
Гранитный тип (G)						
C	–	–	–	<u>0.24–0.90</u> 0.54	<u>0.20–1.25</u> 0.59	<u>0.20–1.25</u> 0.56
E	–	–	–	–	2 / 21.4	2 / 9.8
C _E	–	–	–	–	<u>0.42–0.58</u> 0.49	<u>0.42–0.58</u> 0.49
Глинистый тип (C)						
C	–	–	–	–	<u>0.072–1.80</u> ³ 0.44	<u>0.072–1.80</u> 0.44
E	–	–	–	–	3 / 18.7	3 / 18.7
C _E					<u>0.38–0.70</u> 0.60	<u>0.38–0.70</u> 0.60
Саларный тип (S)						
C					<u>0.02–0.36</u> ⁴ 0.16	<u>0.02–0.36</u> ⁴ 0.16
E	–	–	–	–	16 / 83.3	16 / 83.3
C _E					<u>0.02–0.36</u> 0.18	<u>0.02–0.36</u> 0.18
Геотермальный тип (GT)						
C					<u>0.03–0.04</u> 0.035	<u>0.03–0.04</u> 0.035
E	–	–	–	–	2 / 15.3	2 / 15.3
C _E					<u>0.035</u> 0.035	<u>0.035</u> 0.035
Нефтегазовых полей тип (OG)						
C					<u>0.013–0.078</u> 0.018	<u>0.013–0.078</u> 0.018
E	–	–	–	–	1 / 5.8	1 / 5.8
C _E					<u>0.029</u> 0.029	<u>0.029</u> 0.029

Примечание. ¹ C – интервал средних содержаний в месторождениях в числителе, средневзвешенное значение содержаний в знаменателе (% Li₂O); E – количество месторождений, где производство лития в промышленных масштабах осуществлялось когда-либо в течение последних 50 лет, или оно осуществляется в настоящее время, или уже строится эксплуатационный комплекс / доля этих месторождений (%) от оцененных ресурсов всех месторождений данного типа в данном цикле; C_E – аналогично C, но только для месторождений из категории E; ² значение 4.68% месторождения Плюмбаго-Норт (фиг. 3) исключено из подсчета средневзвешенного содержания из-за сомнений в корректности его вычисления: это беспрецедентно аномальное среднее значение в предварительно оцененном объекте (Simmons et al., 2020) без возможности проверки из-за отсутствия технического доклада в общем доступе; ³ для собственно глинистого подтипа, т.е. без ядаритового подтипа, максимальное значение – 0.63%, а средневзвешенное – 0.33%; ⁴ максимальное значение без гиганта Салар-де-Атакама – 0.12%, а средневзвешенное – 0.075%.



Фиг. 3. Оцененные геологоразведочными работами запасы/ресурсы и средние содержания Li_2O в месторождениях выборки, использованные для анализа. Логарифмическая шкала по двум осям. Условные обозначения и номера месторождений идентичны фиг. 1.

основной интерес на литий представляют руды петалит-сподуменового и сподуменового состава. Они сосредоточены в двух нижних предварительно оцененных свитах жил, которые залегают намного глубже, чем выходящая на поверхность и детально разведанная верхняя свита с богатыми танталовыми рудами, но с бедной литиевой минерализацией эвкриптит-петалитового состава (Линде и др., 2000).

Оба месторождения *родинийского цикла* в анализируемой выборке длительно эксплуатировались в прошлом, но никогда не отрабатывались на литий. На месторождении Манонэ—Китотоло более шестидесяти лет с переменной интенсивностью добывали касситерит и тантало-ниобаты из мощной (до 100 м) коры выветривания. Активные геологоразведочные буровые работы на литий были начаты менее десяти лет назад. Уже сейчас это крупнейшее в мире разведанное месторождение лития пегматитового типа, причем с более высоким средним содержанием Li_2O (1.65%), чем это определено для типа в целом (фиг. 3, табл. 3). Однако реальный масштаб месторождения, несомненно, еще больше: из нескольких пегматитов с подтвержденной литиевой рудоносностью в данном проекте пока оценено только одно тело (Рош-Дюр в сегменте Китотоло), причем не самое крупное и не по всему его простиранию разведанное (AVZ Minerals Ltd., 2020). Прогнозные оценки специалистов, осуществляющих работы, указывают на то, что после полного комплекса геологоразведочных работ суммарные ресурсы всего месторождения должны быть как минимум в 2.5 раза больше уже подтвержденных бурением.

Масштаб ресурсов и содержание лития на месторождении Камативи много меньше (фиг. 3). Тем не менее и оно — объект активных геологоразведочных работ. Из сведений, публично предоставляемых компаниями, владеющими правами на эти месторождения, следует, что параллельно ведутся проектные работы для будущего строительства предприятий, производящих сподуменовый концентрат. Впрочем, ввод их в строй в ближайшие три года маловероятен.

Среди пегматитовых месторождений *пангейского цикла* в фазе активной эксплуатации с извлечением лития находятся Цзяцзика (крупнейший производитель сподуменового концентрата в Китае), Елунгоу, Данба и два участка (Кашуэйра, Шуша) на западе пегматитового поля Итинга из восьми разведанных там к настоящему времени.

В XX в. многие десятилетия эксплуатировались на литий и другие редкие металлы месторождения Коктогай, Кингс-Маунтин и Холман-Бим. Сейчас рудники законсервированы, но на двух последних недавно проведены дополнительные геологоразведочные работы с позитивными для восстановления добычи результатами.

Рудник Юис на протяжении уже целого века с переменной интенсивностью и некоторыми перерывами производит касситеритовый концентрат. После нескольких лет комплексных геологоразведочных и технологических работ здесь недавно также начали получать петалитовый концентрат, который, как ожидается, станет главным продуктом предприятия на обозримую перспективу (Andrada..., 2023). Другой африканский рудник, Кентича, более 30 лет извлекал танталониобаты из коры выветривания. После остановки этого производства была проведена разведка той части пегматитового тела, которая не захвачена корой выветривания: оцененные здесь ресурсы по среднему содержанию и количеству Li_2O оказались сопоставимы с текущими аналогичными характеристиками месторождения Юис, но при другом, сподуменовом, составе руды (фиг. 3; петалит). Начало освоения этой части месторождения ожидается в 2024 г. Однако, судя по сообщениям в бизнес-прессе, имеется серьезный спор о легитимности лицензии на добычу между владеющей ею компанией и правительственными структурами Эфиопии, что может задержать процесс на неопределенное время.

Месторождение Лицзягоу — в стадии начального освоения. Остальные пегматитовые месторождения выборки пангейского цикла были пока только оценены с разной степенью детальности геологоразведочными работами, и многие из них еще продолжают разведываться. Недавно было лицензировано Тастыгское месторождение в Республике Тыва, однако начало его эксплуатации трудно ожидать раньше, чем через несколько лет.

Перечисленные выше эксплуатировавшиеся, эксплуатируемые и подготавливаемые к эксплуатации в ближайшие 1–2 года пегматитовые месторождения заключают в себе 45.2% ресурсов данного типа в цикле (табл. 3), т.е. немного больше своей доли в количестве месторождений (10 из 26 или 38.5%). В отличие от кенорского и колумбийского циклов, среднее содержание лития в эксплуатируемых запасах немного ниже, чем в среднем по выборке цикла: 1.29 против 1.37%

Li_2O . Объяснение кроется в том, что все месторождения, “тянущие” показатель среднего содержания вверх (Байлуншань и др. — см. фиг. 3), выявлены только в последнее десятилетие и еще даже не до конца разведаны. При этом Байлуншань является крупнейшим месторождением в обсуждаемом цикле и содержит четверть всех ресурсов лития, оцененных в пегматитах этого периода.

Среди пегматитовых месторождений *амазийского* цикла только на Завитинском имела место добыча литиевых руд. Здесь они относительно бедные для своего типа (табл. 3; фиг. 3), но рудник находится в районе с хорошей инфраструктурой. Сейчас он на консервации, хотя половина изначально разведанных запасов еще не извлечена. В принципе, в мире есть пример рентабельной в современных условиях эксплуатации пегматитового месторождения со столь же бедными первичными рудами — Юис. Кроме того, есть информация о практическом интересе к добычным отвалам Завитинского месторождения, на которых уже проводятся геологоразведочные работы и начато предварительное проектирование предприятия по их утилизации (Похиленко и др., 2023).

Месторождения Гиндукуш—Гималайского пояса содержат руды со средними содержаниями в 1.8–2.6 раза более высокими, чем в Завитинском (фиг. 3), что даже выше, чем в среднем по пегматитовому типу в целом. Все они находятся в высокогорных районах с плохо развитой инфраструктурой. Кроме того, для месторождений Афганистана негативным фактором для перспектив освоения служит политическая нестабильность в стране. При этом они оценены только предварительно в своих приповерхностных частях и нуждаются в более детальной разведке (Стажило-Алексеев, 2012; Zhao et al., 2021). Очень трудно ожидать их освоения в ближайшие годы.

Гранитный тип

Кроме месторождений Алахинского и Шавазсай, остальные представители гранитного типа из *пангейского* цикла имеют эксплуатационную историю, иногда — многовековую. Первичные руды были продуктивны для извлечения Sn и W или Zn и флюорита, а коры выветривания стали источником каолина. Сейчас эти рудники, кроме каолиновых, законсервированы. Литий в них не был предметом коммерческого интереса за единственным исключением: в первой половине XX в. на месторождении Циннвальд

попутно с извлечением касситерита периодически производили слюдяной литиевый концентрат, но объемы были небольшими — <1 тыс. т Li_2O за все время (Kuhn, Schultheis, 2022).

В последнее десятилетие на всех европейских месторождениях гранитного типа велись (на некоторых продолжают и сейчас) целенаправленные геологоразведочные работы для оценки общих ресурсов и промышленных запасов лития. В технических докладах по этим проектам декларируется рентабельность вероятных будущих рудников, но пока строительство ни одного из них не начато.

Из месторождений гранитного типа, образовавшихся в *амазийском* цикле, эксплуатируются два. Рудник Ичунь существует уже почти полвека и все это время производит редкометалльные концентраты, в том числе и слюдяной литиевый. Это предприятие — старейшее из действующих в Китае с таким производством и все еще одно из крупнейших. Месторождение Даган многие годы отрабатывалось на керамическое сырье, но в последнее время стало выпускать и слюдяной литиевый концентрат. Суммарные ресурсы этих двух эксплуатируемых на литий месторождений составляет 21.4% от ресурсов месторождений данного типа в *амазийском* цикле и 9.8% от всех ресурсов гранитного типа в выборке (табл. 3). Средневзвешенное содержание лития в них немного ниже, чем по типу в целом (табл. 3), но в этом аспекте важно помнить, что в обоих случаях литиевый концентрат — попутный продукт.

Космоснимки региона, в котором находятся месторождения Ичунь и Даган, указывают на то, что эксплуатируются и остальные месторождения Южно-Китайского пояса из нашей выборки. Поскольку геологоразведочные работы на литий там тоже были проведены, то не исключено, что кроме керамического сырья эти рудники выпускают и литиевые концентраты. Однако авторы не имеют достоверных данных об этом.

Эксплуатационную историю, но без связи с литиевой проблематикой, имеют еще два объекта. Месторождения Кестер и Орловское прежде отрабатывались на Sn, а Орловское также и на Ta—Nb. Сейчас они законсервированы. Остальные месторождения гранитного типа в *амазийском* цикле активно разведывались в последнее десятилетие или все еще разведываются, но о конкретных планах их отработки в ближайшие годы сведений в общем доступе нет.

Глинистый тип

История промышленного освоения таких месторождений для получения лития находится вблизи нулевой отметки. Геологоразведочные работы на них начали проводить только в XXI в., и ни одно из этих месторождений еще не стало объектом полномасштабной эксплуатации. На месторождениях Такер-Пасс, Сонора и Риолит-Ридж, представляющих собственно глинистый подтип, ведется опытная малообъемная добыча, но на первых двух уже строятся промышленные добычные и перерабатывающие комплексы. Средние содержания в их рудах выше среднего по подтипу (фиг. 3; табл. 3).

На месторождении Ядар – единственном представителе ядаритового подтипа, был завершен полный комплекс геологоразведочных работ с подсчетом запасов и составлением проекта эксплуатационного комплекса. Однако полученная компанией лицензия была отозвана из-за протестов местного населения, опасавшегося негативных экологических последствий. Поэтому перспективы освоения этого очень крупного месторождения с высокими содержаниями лития (фиг. 3) пока не ясны.

Изученность остальных месторождений глинистого типа находится на уровне геологоразведочных работ разных стадий, преимущественно ранних.

Саларный тип

Впервые промышленное производство литиевых продуктов из саларных рассолов, хотя и небольшое по современным меркам, было организовано в США на месторождении Серлз-Лэйк накануне Второй мировой войны (Anstett et al., 1990). Однако до последней четверти XX в. значение типа в сумме добываемого сырья было очень скромным. Оно стало быстро расти после открытия и введения в эксплуатацию более богатых и крупных месторождений Литиевого треугольника. К рубежу XX и XXI вв. на месторождения типа приходилось более половины мировой добычи, а в последующие годы эта доля иногда достигала 2/3. Тенденция изменилась с 2017 г., когда Австралия кратно увеличила и продолжает увеличивать производство минеральных концентратов (преимущественно spodumеновых) на своих пегматитовых месторождениях (Jaskula, 2022). Тем не менее значение саларного типа не опускается ниже 1/3 мировой добычи (Jaskula, 2023). Более того, появилось много сообщений (бизнес-пресса, сайты производителей) о намерениях

добывающих компаний расширить производство как на имеющихся предприятиях, так и на новых объектах в двух главных для данного типа провинциях. Особенно этому должно способствовать все более широкое внедрение технологий прямого извлечения лития (direct lithium extraction – DLE), позволяющих использовать рассолы с неблагоприятным для традиционного метода поэтапного выпаривания химическим составом и к тому же значительно сокращающих по времени производственный цикл (Liu et al., 2023).

В настоящее время полномасштабно разрабатываются 13 месторождений, которые заключают в себе 63.1% всех ресурсов данного типа в анализируемой выборке при средневзвешенном содержании 0.213% Li_2O (табл. 3; фиг. 3). Эта категория включает и крупнейшее в мире (среди всех типов) месторождение Салар-де-Атакама с самыми богатыми и благоприятными для использования даже традиционных технологий рассолами (фиг. 3). Еще 3 месторождения находятся в начальной стадии промышленного освоения (Электронное приложение). Их доля в ресурсах типа 20.2%, а средневзвешенное содержание Li_2O только 0.079%. В ресурсах оставшихся неэксплуатируемых пока объектов средневзвешенное содержание 0.072% Li_2O (фиг. 3; Электронное приложение).

Таким образом, большинство месторождений саларного типа, включая самые богатые и крупные, уже вовлечены или вводятся в промышленное производство литиевых продуктов. Оставшийся ресурсный фонд заметно беднее. Тем не менее и на таких объектах в последние годы велись активные геологоразведочные работы, т.к. прогнозируемое увеличение потребления литиевых продуктов, соответствующая динамика цен, использование технологий DLE и опыт эксплуатации похожих месторождений позволяет также их рассматривать как потенциально промышленные. Кроме того, нельзя не отметить, что прогнозный потенциал данного типа месторождений исчерпан в наибольшей степени среди всех типов месторождений из-за сильно ограниченных условий для локализации и простоты их обнаружения на поверхности. Заметное увеличение количества новых объектов в будущем вряд ли возможно.

Геотермальный тип

Промышленное значение месторождений геотермального типа пока ничтожно мало. Однако со временем это должно измениться, даже несмотря на то что средние содержания Li_2O

в геотермальных рассолах анализируемой выборки достаточно низкие: 0.03–0.04% (фиг. 3; табл. 3). По этому показателю они близки самым бедным месторождениям саларного типа (фиг. 3), рентабельная эксплуатация которых наиболее вероятна при использовании технологий DLE. Такого типа технологии являются единственным вариантом и для всех геотермальных рассолов. При этом следует заметить, что их доставка на поверхность полностью окупается уже на первой стадии утилизации за счет получения энергии.

На данный момент построен только один завод по получению литиевых продуктов на основе геотермальных рассолов. Его сырьевой базой служат месторождения Верхнерейнского рифта (Vulcan..., 2023). Выход этого производства на полную мощность планируется в течение ближайших двух лет. Ожидаемая высокая результативность реализации проекта как в экономическом, так и экологическом аспектах, станет хорошим стимулом для освоения уже известных и разведки новых месторождений данного типа в мире. Вместе с тем, они вряд ли когда-либо станут доминирующими в производстве литиевой продукции, т.к. на таких месторождениях все процессы лимитированы объемами добычи для получения энергии и техническими возможностями для обратной закачки отработанных рассолов в недра.

Нефтегазовых полей тип

Месторождения рассолов нефтегазовых полей вышли на орбиту практического интереса приблизительно в одно время с геотермальными месторождениями. Промышленное извлечение лития из них на данный момент также связывают исключительно с развитием технологий DLE. Последние три года действует опытно-промышленное производство карбоната и гидроксида лития из рассолов месторождения Смэкоувер-Ланзесс. Эти рассолы поступают после извлечения из них брома — главного продукта предприятия, работающего здесь уже более полувека. Полномасштабное производство литиевых продуктов запланировано на 2026 г. (Brush et al., 2023). На соседнем месторождении Смэкоувер-Тетра концентрация брома ниже рентабельных значений, а содержание лития, наоборот, в 2.5 раз выше, чем в Смэкоувер-Ланзесс (0.079 против 0.031% Li_2O) (фиг. 3). Начало его эксплуатации предварительно запланировано на 2027–2028 гг. (Gay et al., 2023). Оба эти месторождения содержат самые высокие концентрации лития

в месторождениях данного типа в Северной Америке.

Сопоставимое среднее содержание (0.059%) установлено в разведываемых рассолах Ковыктинского месторождения на Сибирской платформе (фиг. 3), которые также намечаются к освоению, но реальные сроки этого нигде не обнародованы.

Месторождения бассейнов Парадокс, Уиллистон и Западно-Канадского имеют рассолы еще менее богатые литием: в среднем 0.013–0.022% Li_2O . Геологоразведочные работы здесь продолжаются, а их эксплуатационные перспективы пока четко не определены.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученная картина распределения разведанных ресурсов лития демонстрирует реально зафиксированную в земной коре историю их формирования. Эти сведения не дают прямого ответа о причинах всей сложившейся ситуации, но позволяют в совокупности с некоторыми другими геологическими данными сделать предположения о связях элементов этой картины с разными аспектами эволюционных процессов в литосфере.

Прежде всего, обращает на себя внимание крайне неравномерное распределение в геологическом времени месторождений лития и явные различия как в количестве доступных ресурсов в месторождениях разных суперконтинентальных циклов, так и в спектре типов месторождений, принимавших участие в формировании ресурсов в этих циклах. Особенно четко это видно на примере пегматитового типа, который проявился во всех циклах. Причем, в трех древнейших циклах это единственный тип месторождений лития.

Отмеченное выше появление первых пегматитов LCT-типа с литиевой минерализацией ок. 3.1 млрд лет назад отвечает тому периоду, когда на Земле, согласно и геологическим данным, и модельным построениям, начался переход от доминирующей плюм-тектоники в стагнированной земной коре (т.н. plume-lid tectonics) к плейт-тектонике (Cawood et al., 2022). Это имело место, когда относительно крупные силикатные массивы с оформившимися глубокими литосферными корнями уже получили значительное распространение и все чаще начинали взаимодействовать с океанической корой посредством субдукционного механизма.

В терминальной фазе он мог приводить сиалические блоки к взаимодействию коллизионного типа. Эти же явления способствовали появлению на континентальной коре протяженных высоких форм рельефа (горных хребтов), их эрозии и накоплению первых в геологической истории мощных (3–6 км) толщ терригенных осадков, в т.ч. в значительной своей части песчано–глинистых и глинистых (Hessler, Lowe, 2006; Hofmann, 2005). Такие породы богаты щелочными (Li, Rb, Cs) и нещелочными (Be, Sn, Ta) редкими металлами, а также калием (Григорьев, 2009). Если же рассматривать земную кору мезоархей, то эти толщи были самыми богатыми резервуарами редких элементов. При этом хорошо известно, что именно метаморфозы с такими осадочными протолитами – принципиально важный источник вещества для плюмазового гранитоидного магматизма, с которым редкометалльные пегматиты LCT-типа всегда находятся в генетической или парагенетической связи (Simmons et al., 2003; Tkachev, 2011; Wise et al., 2022). Поэтому тот факт, что древнейший всплеск массового формирования таких гранитов произошел в мезоархее (Cawood et al., 2022), никак не случаен. Следовательно, появление в мезоархее первых в геологической истории пегматитов с литиевой минерализацией, в том числе с какого-то момента и промышленно интересной, также не менее закономерно. Дальнейшее увеличение масштабов всех этих процессов и вероятное повторное вовлечение в магмогенерирующие процессы вещества ранее внедрившихся внутрикоровых гранитоидов, которые обычно имеют повышенный геохимический фон всех перечисленных редких элементов, обусловило выделяемый в данном исследовании всплеск продуктивности литиеносных пегматитов в рамках кенорского цикла.

Снижение пегматитогенерирующей активности от кенорского цикла к колумбийскому и еще более резко – к родинийскому, также требует объяснения. Эта тенденция хорошо коррелирует с тем фактом, что вторая половина колумбийского цикла и весь родинийский цикл совпадают с периодом геологического развития земной коры в приблизительном интервале 0.8–1.8 млрд лет назад, который наиболее часто именуют “скучный миллиард” (“boring billion”) (Holland, 2006; Roberts, 2013). Он характеризуется резким снижением и интенсивности, и экстенсивности многих эндогенных процессов, обусловленных субдукционной и коллизионной тектоникой, при увеличении масштабов внутриплитных

процессов (Cawood et al., 2022). Особенно отметим наиболее тесно связанные с темой данного исследования моменты, которые характеризуют “скучный миллиард” в сравнении с другими отрезками геологической истории: 1) он в принципе заметно уступает всем как более древним, так и более молодым периодам по количеству орогенных поясов; 2) в орогенах этого периода проявления литиеносных пегматитов и вообще пегматитов LCT-типа, к которому они всегда принадлежат, относительно малочисленны и, как правило, с маломасштабными проявлениями редкометалльной минерализации за редчайшими исключениями, вошедшими в анализируемую здесь выборку; 3) аналогичная тенденция отмечена и для ряда других типов месторождений, а именно – резкое уменьшение в данном периоде количества месторождений, генетически связанных с орогенными поясами (Ткачев, Рундквист, 2016; Bradley, 2011; Li J. et al., 2023; Liu et al., 2019; McCauley, Bradley, 2014; Tkachev, 2011).

С началом пангейского суперконтинентального цикла связано возрождение высокой интенсивности плейт-тектонической геодинамики в глобальном масштабе. Это позитивно отразилось и в металлогении лития: по количеству месторождений и суммарных ресурсах в них кенорский и пангейский цикл статистически выражены практически одинаково (табл. 2).

Однако плейт-тектоника пангейского цикла происходила в несколько изменившихся условиях, что было обусловлено, главным образом, значительным остыванием мантии и соответствующим снижением теплового потока в литосфере по сравнению с ранним докембрием (Labrosse, Jaupart, 2007; Torsvik et al., 2021; Cawood et al., 2022). Помимо прочего, это получило выражение и в эндогенной металлогении лития: именно в пангейском цикле возникли первые представители нового типа месторождений – гранитного. Их массовое появление именно в этом цикле, вероятно, связано с уже упомянутым общим уменьшением теплового потока в литосфере по сравнению с более древними эпохами. Такое изменение во вмещающей среде должно было способствовать сокращению во времени относительно высокотемпературной стадии развития коллапсирующих коллизионных орогенов, в недрах которых формировались материнские магмы будущих редкометалльных месторождений. Это обуславливало ускоренную, по сравнению с раннедокембрийскими орогенами, эволюцию реологического поведения

глубинных комплексов пород в направлении широкомасштабных хрупких реакций. Таким образом, значительно возросла вероятность возникновения обстановок, в которых расплавы могли покидать области их зарождения и начальной дифференциации, поднимаясь на уровни земной коры, которые находятся ближе к поверхности, чем те уровни, где обычно формируются редкометалльные пегматиты. На этих более высоких уровнях кристаллизовались массивы Li–F гранитов с экономически привлекательными аккумуляциями редких металлов, включая литий, в некоторых из них. Среднее количество ресурсов в месторождениях гранитного типа заметно меньше, чем в пегматитовом типе, но средние содержания Li_2O в их рудах разнятся еще более контрастно (табл. 2; табл. 3). Эта разница в средних концентрациях лития является важнейшей причиной намного более низкой степени вовлеченности месторождений гранитного типа в промышленное освоение по сравнению с пегматитовым типом.

В амазийском цикле количество месторождений и выявленных ресурсов лития, представляющих гранитный тип, уже больше, чем у пегматитового типа. Прежде всего, обращает на себя внимание тот ранее отмеченный факт, что месторождения гранитного типа в амазийском цикле установлены не только в связи с постколлизийными орогенами, но и в орогенах окраинно-континентального типа. В пангейском цикле месторождений в такой позиции не было, или они, возможно, не сохранились, т.к. других объективных причин для данного положения вещей авторы не видят.

Кроме того, несомненную роль в резком уменьшении количества пегматитовых месторождений лития в амазийском цикле относительно пангейского могут иметь еще два фактора. Во-первых, редкометалльные пегматиты формируются в абиссальных условиях и для их эксгумации на уровни, доступные для геолого-разведочных работ, требуются от десятков до сотен миллионов лет. Поэтому степень вскрытия на современном эрозионном срезе объектов данного типа, возникших в амазийском цикле, менее значительна по сравнению с аналогами в других циклах из-за соответствующей разницы в их возрасте. Во-вторых, имеет значение и очевидная незавершенность цикла: редкометалльные пегматиты, в том числе и литиеносные, образуются в коллизийных орогенах на стадии их коллапса (Simmons et al., 2003; Tkachev, 2011). Такие орогены наиболее интенсивно формируются

на кульминационной стадии объединения ранее разрозненных сиалических блоков в гигантский суперконтинент (Rogers, Santosh, 2004). Среди уже завершенных циклов исключением из этой тенденции стал только колумбийский, в котором финальная фаза формирования суперконтинента пришлось на самую середину “скупного миллиарда”, когда уровень “торможения” плейт-тектонической геодинамики был вблизи максимума (Roberts, 2013; Sawood et al., 2022). Соответствующие негативные последствия для металлогении литиеносных пегматитов во второй половине колумбийского цикла описаны выше. Текущий цикл еще только приближается к своей середине, и активная фаза образования коллизийных поясов завершающей стадии, которые сформируют будущий суперконтинент, чаще всего называемый в публикациях как Амазия, пока еще в далекой перспективе (Duarte et al., 2018). Можно смело ожидать, что произойдет и соответствующее увеличение количества месторождений лития пегматитового и гранитного типов, связанных с такими поясами.

Обращают на себя внимание наиболее высокие средние содержания лития в пегматитовых рудах родинийского и амазийского циклов, которые выше, чем в любом из других циклов и выше среднего значения для всего типа (табл. 3). Однако авторы предполагают, что данная ситуация может быть эффектом недостаточно большого объема выборки для этих двух циклов: в кенорском, колумбийском и пангейском циклах есть месторождения и с более высокими значениями среднего содержания, но они компенсируются достаточным количеством объектов с бедными рудами (фиг. 3). В амазийском и, особенно, родинийском циклах выборки намного меньше, и статистическая вероятность случайности высокого среднего значения содержания лития в масштабах этих циклов существенно выше.

Наличие месторождений глинистого типа в формациях только амазийского цикла и отсутствие их аналогов как минимум в пангейском цикле, пока не имеет исчерпывающего объяснения. Можно предположить, что это связано с двумя факторами, практическая неизбежность действия которых приближает к нулю вероятность сохранности этих приповерхностных месторождений в более древних, чем юрские, формациях. Во-первых, для их рудовмещающих комплексов, локализованных в постколлизийных и надсубдукционных орогенных обстановках с увеличением возраста прогрессивно растет

и вероятность быть эродированными. Во-вторых, все разведанные месторождения данного типа залегают в породах, имеющих раннедиагенетическую стадию литификации, и очень высока вероятность того, что даже избежавшие первого сценария руды со временем испытывали сильное разубоживание благодаря более глубоким диагенетическим изменениям. В этих условиях рудообразующий литий, который в основной своей массе даже не входит в структуры аккумулярующих его глинистых минералов из групп смектита и иллита (табл. 1), отчасти мог закрепляться в структурах новообразованных филосиликатов типа хлорита или слюды, но преимущественно переходил в диагенные растворы и, мигрируя на значительные расстояния, выносился вовне, рассеиваясь. Данный сценарий поведения лития согласуется как с экспериментальными исследованиями и наблюдениями в региональных профилях с меняющейся под влиянием *PT*-условий степенью диагенетических изменений глинистых пород (Coffey et al., 2021; Merriman et al., 2009), так и с общей статистикой содержания лития в таких породах с разным уровнем диагенеза и метаморфизма (Григорьев, 2009; Слепнев и др., 1964; Солодов и др., 1980).

Для месторождений в рассолах по понятным причинам пока нет возможности обсуждать эволюционный аспект. Вместе с тем, очень интересны особенности прогресса в их освоении в XXI в.

До недавнего времени из всех месторождений, связанных с рассолами, экономический интерес для извлечения лития представляли только некоторые объекты саларного типа (Атакама, Омбрэ-Муэрто, Силвер-Пик, Цзабуе), имеющие благоприятный состав с относительно высокими значениями отношений Li/Mg и Li/SO_4 . Это обеспечивает приемлемо высокий выход лития в конечный продукт при использовании традиционной и очень простой технологии полиэтапного выпаривания в естественных субэвaporальных условиях (Munk et al., 2016). И именно из-за неблагоприятного состава, дающего обратный результат при такой технологии, откладывалось в течение долгого периода освоение многих других месторождений в рассолах Литиевого треугольника, в частности — гиганта Уюни. Бурное развитие в XXI в. технологий DLE, использующих различные методы экстракции и пурификации рассолов, обычно в разных сочетаниях друг с другом (адсорбция, ионный обмен, мембраны, специальные растворители, электрохимия,

хроматография и др.) (Li et al., 2018; Liu et al., 2023; и ссылки там), дало возможность как существенно расширить экономически привлекательную ресурсную базу саларного типа, так и по-новому взглянуть на ресурсы лития в рассолах геотермальных и нефтегазовых полей. В двух последних типах в принципе отсутствуют благоприятные составы для традиционной технологии, включая и тот аспект, что содержания лития очень низкие — на самой нижней границе рассолов в рассолах (фиг. 3; табл. 3).

Следует также обратить внимание на то, что несмотря на значительное количественное превосходство ресурсной базы эксплуатируемых месторождений саларного типа над аналогичным показателем месторождений пегматитового типа, именно благодаря последним была быстро увеличена добыча лития в текущем периоде в связи с увеличением соответствующих потребностей в мировой экономике.

Важной причиной менее значительной роли рассолов в этом “рывке” кроется в том, что на большинстве месторождений саларного типа с традиционной технологией трудно найти новые большие площади для размещения дополнительных бассейнов выпаривания рассолов, необходимых для резкого увеличения производства продукции. Как следствие — их гигантские запасы не были реализованы в соразмерное увеличение производства литиевых продуктов. Прочие месторождения рассолов, эксплуатация которых возможна только при использовании DLE-технологий, тоже мало внесли в увеличение производимых объемов лития: они пока еще находятся в начальной фазе освоения, зачастую с незавершенными в достаточном объеме работами по адаптации этих технологий к полномасштабному применению в промышленном производстве на конкретном объекте. По мнению практически всех специалистов, вовлеченных в данную проблематику, эксплуатация этих пионерских месторождений со сложным химическим составом рассолов и, в основном, с низкими содержаниями лития, должна показать достаточно высокую рентабельность в ближайшей перспективе. После этого можно ожидать кратного увеличения масштабов извлечения лития из месторождений таких типов. Тем более что применение DLE-технологий оставляет принципиально меньший “углеродный след”, чем все остальные технологии, традиционно используемые для добычи лития, особенно на месторождениях с твердыми рудами (Vulcan..., 2023). Этот экологический аспект в современных условиях

всегда принимается во внимание при принятии решений об эксплуатации месторождений. Со временем он может вызвать еще более сильный разворот в сторону увеличения и объемов геологоразведочных работ на месторождениях, где DLE-технологии применимы. Особенно широкий фронт таких работ можно ожидать на нефтегазовых полях и, вероятно, других территориях древних платформ, прогнозный потенциал которых многократно превышает уже разведанные там ресурсы (Alexeev et al., 2020; Huff, 2016; и ссылки там).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ очень объемной глобальной выборки из 164 месторождений, в которых заключены почти все промышленно значимые или потенциально экономически интересные ресурсы лития в мире, показал, что они формировались в разные геологические эпохи в интервале от позднего мезоархея до современности.

2. Распределение этих ресурсов на шкале геологического времени имеет ярко выраженный дискретный импульсный характер. Набор типов месторождений, сформировавших эти импульсы, различается между тремя наиболее древними суперконтинентальными циклами и двумя их молодыми аналогами: кенорский, колумбийский и родинийский циклы представлены только пегматитовым типом, в пангейском среди промышленно интересных появился также гранитный тип, а в амазийском добавились и все остальные типы. Отнесение месторождений типа нефтегазовых полей исключительно к текущей стадии сделано с определенной долей условности, т.к. некоторые из них могли начать свое формирование в палеозое и мезозое.

3. Суперконтинентальные циклы сыграли разную роль в формировании разведанной в настоящее время ресурсной базы месторождений лития. Месторождения кенорского цикла имеют в ней долю 10.8%, колумбийского – 2.7%, родинийского – 2.9%, пангейского – 10.7%, амазийского – 72.9%.

4. Для месторождений с твердыми рудами (пегматитовый, гранитный, глинистый) все импульсы тяготеют к периодам интенсификации орогенных процессов в глобальном масштабе, что характерно для тектонических фаз активного формирования суперконтинентов и составляющих их крупных сиалических блоков земной коры. В период, включающий

суперконтинентальные циклы от кенорского до пангейского, все месторождения пегматитового и гранитного типов формировались на постороженной стадии развития коллизионных поясов. В амазийском цикле преобладает в этом аспекте сохранилась, но также установлены месторождения гранитного и глинистого типа, которые формировались в тыловых зонах активных континентальных окраин. На современном эрозионном срезе именно они преобладают в своих типах.

5. Отмечено снижение интенсивности формирования пегматитовых месторождений от кенорского к родинийскому циклу, что хорошо коррелируется с наступлением “скучного миллиарда” в середине колумбийского цикла и его завершением в конце родинийского цикла.

6. Среди месторождений с твердыми рудами максимальное промышленное значение для мировой экономики имеют месторождения пегматитового типа кенорского цикла. В эксплуатацию вовлечены почти все самые крупные месторождения (> 1 млн т Li_2O) и часть более мелких объектов из его выборки. Среднее качество руд в эксплуатируемых объектах выше, чем в резервных. Аналогичная ситуация фиксируется и для месторождений колумбийского цикла. Среди месторождений пангейского цикла эксплуатацией затронуты объекты с показателями ниже среднего для этого цикла, что обусловлено недавним открытием месторождений с более высокими характеристиками. Из месторождений амазийского цикла с твердыми рудами активно эксплуатируются только два в гранитном типе. Три месторождения нового для промышленности глинистого типа находятся в стадии начального освоения с акцентом на отработку технологическим схем в режиме промышленного эксперимента. Месторождения родинийского цикла пока не разрабатываются на литий.

7. Среди месторождений в рассолах максимальное промышленное значение у представителей саларного типа, пригодных для традиционной технологии, основанной на полиэтапном выпаривании. Разработка и внедрение в последние годы технологий DLE для извлечения лития из рассолов любого солевого состава не только расширило сырьевую базу в рамках саларного типа, но также вовлекло в эту базу новые типы месторождений – геотермальный и нефтегазовых полей. Однако все месторождения, осваиваемые с использованием технологий DLE, находятся в начальной стадии освоения и их

реальное промышленное значение в долгосрочной перспективе еще не определено, но его увеличение очень вероятно.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны анонимным рецензентам за внимательное прочтение рукописи и сделанные замечания и рекомендации. Их учет помог авторам более четко и корректно описать результаты своих исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены при финансовой поддержке государственных НИР ГГМ РАН по теме № 1021061009468-8-1.5.1 (FMMR-2022–0013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абушкевич В.С., Сырицо Л.Ф. Изотопно-геохимическая модель формирования Li–F гранитов Хангайского рудного узла в Восточном Забайкалье. СПб.: Наука, 2007. 148 с.
- Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Лаломов А.В., Мурашов К.Ю. Проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности России // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 5. С. 371–386. <https://doi.org/10.31857/S0016777023050039>
- Боярко Г.Ю., Хатьков В.Ю., Ткачева Е.В. Сырьевой потенциал лития России // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 12. С. 7–16. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3975>
- Викентьев И.В. Критическое и стратегическое минеральное сырье в Российской Федерации // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 5. С. 463–475. <https://doi.org/10.31857/S0016777023050106>
- Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части земной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 383 с.
- Линде Т.П., Ставров О.Д., Юшко Н.А., Петрова Н.В., Тютюнник Н.Д., Рябцев В.В., Шадрман Ф.И., Шпанов Е.П., Матиас В.В. Литий России: состояние, перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы // Минеральное сырье (серия геолого-экономическая). М.: ВИМС. 2000. № 6. 116 с.
- Мамарозиков У.Д., Ахунджанов Р., Сайдыганиев С.С., Суюндикова Г.М. Онгонитовый магматизм Срединного Тянь-Шаня // Науки о Земле. 2012. № 1. С. 14–31.
- Морозова Л. Колмозерское литиевое месторождение редкометалльных пегматитов: новые данные по редкоэлементному составу (Кольский полуостров) // Литосфера. 2018. Т. 18. № 1. С. 82–98. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-1-082-098>
- Похилenko Н.П., Афанасьев В.П., Толстов А.В., Крук Н.Н., Похилenko Л.Н., Иванова О.А. Перспективы развития и проблемы освоения сырьевой базы дефицитных стратегических видов твердых полезных ископаемых Сибири // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 5. С. 476–492. <https://doi.org/10.31857/S0016777023050088>
- Прокопьев А.В., Борисенко А.С., Гамянин Г.Н., Фридовский В.Ю., Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С., Трунилина В.А., Васюкова Е.А., Иванов А.И., Травин А.В., Королева О.В., Васильев Д.А., Пономарчук А.В. Возрастные рубежи и геодинамические обстановки формирования месторождений и магматических образований Верхояно-Колымской складчатой области // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 10. С. 1542–1563. <https://doi.org/10.15372/GiG20181004>
- Романюк Т.В., Ткачев А.В. Геодинамический сценарий формирования крупнейших мировых миоцен-четвертичных бор-литиеносных провинций. М.: “Светоч Плюс”, 2010. 304 с.
- 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.
- Слепнев Ю.С., Солодов Н.А., Бойко Т.Ф. Литий // Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов. Т. 1. Геохимия редких элементов. М.: Наука. 1964. С. 19–50.
- Солодов Н.А. Кислые редкометалльные граниты // Месторождения литофильных редких элементов (Л.Н.Овчинников, Н.А.Солодов – ред.). М.: Недра, 1980. С. 62–82.
- Солодов Н.А., Балашов Л.С., Кременецкий А.А. Геохимия лития, рубидия и цезия. М.: Недра. 1980. 233 с.
- Стажило-Алексеев К.Ф. Магматизм и эндогенная металлогения Афганистана. М.: Геоинформмарк, 2012. 480 с.
- 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. <https://doi.org/10.7868/S0016777016040079>
- Ткачев А.В., Рундквист Д.В., Вишневская Н.А. Главные геосторические особенности металлогении лития // ДАН. 2019. Т. 484. № 2. С. 200–205. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524842200-205>

- Толкушина Е.А., Торицова М.В., Комин М.Ф. Минерально-сырьевая база лития: проблемы развития и использования // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2012. № 2. С. 2–9.
- Юдин В.В. Геодинамика Черноморско-Каспийского региона. Киев: УкрГГРИ. 2008. 117 с.
- Albemarle Corp. 2023 strategic update: transforming essential resources. January 24, 2023. 56 p. URL: https://s201.q4cdn.com/960975307/files/doc_events/2023/Jan/24/2023_01_ALB_Strategic_Update_PPT_Web.pdf (15.06.2023).
- Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Vakhromeev A.G. Brines of the Siberian platform (Russia): Geochemistry and processing prospects // Applied Geochemistry. 2020. V. 117. Paper 104588. 17 p. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104588>
- Andrada Mining Ltd. Drilling delivers a significant lithium resource upgrade at the Uis mine. RNS Announcements. 06 February 2023 URL: https://polaris.brighterir.com/public/andrada_mining/news/rns/story/x4g8q3x (02.08.2023)
- Annikova I.Yu., Vladimirov A.G., Smirnova S.Z., Gavryushkina O.A. Geology and mineralogy of the Alakha spodumene granite porphyry deposit, Gorny Altai, Russia // Geology of Ore Deposits. 2016. V. 58(5). P. 404–426. <https://doi.org/10.1134/S1075701516050020>
- Anstett T.F., Krauss U.H., Ober J.A., Schmodt H.W. International strategic minerals inventory summary report – Lithium. USGS circular 930–I. USGS, 1990. 28 p. <https://doi.org/10.3133/cir930I>
- AVZ Minerals Ltd. AVZ delivers highly positive definitive feasibility study for Manono lithium and tin project. ASX announcement 21 April 2020. 163 p. URL: <https://avz-minerals.com.au/> (12.07.2023)
- Benson T.R., Coble M.A., Dilles J.H. Hydrothermal enrichment of lithium in intracaldera illite-bearing claystones // Science Advances. 2023. V. 9. Iss. 35. Paper eadh8183. 11 p. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh8183>
- Beus A.A. Metallogeny of Precambrian rare-metal granitoids // Revista Brasileira de Geociencias. 1982. V. 12. P. 410–413.
- BloombergNEF. Will the real lithium demand please stand up? Challenging the 1Mt-by-2025 orthodoxy. October 28, 2019. URL: <https://about.bnef.com/blog/will-the-real-lithium-demand-please-stand-up-challenging-the-1mt-by-2025-orthodoxy/> (15.06.2023)
- Borojević Šoštarić S., Brenko T. The Miocene Western Balkan lithium-boron metallogenic zone // Mineralium Deposita. 2023. V. 58. P. 639–658. <https://doi.org/10.1007/s00126-022-01151-x>
- Bowell R.J., Lagos L., de los Hoyos C.R., Declercq J. Classification and characteristics of natural lithium resources // Elements. 2020. V.16 (4). P. 259–264. <https://doi.org/10.2138/gselements.16.4.259>
- Bradley D.C. Secular trends in the geologic record and the supercontinent cycle // Earth-Science Reviews. 2011. V. 108. Iss. 1–2. P. 16–33. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.05.003>
- Bradley D.C., Stillings L.L., Jaskula B.W., Munk L., McCauley A.D. Lithium // Critical mineral resources of the United States – Economic and environmental geology and prospects for future supply. U.S. Geological Survey Professional Paper 1802. 2017. P. K1–K21. <https://doi.org/10.3133/pp1802K>
- Brothers D.S., Driscoll N.W., Kent G.M., Harding A.J., Babcock J.M., Baskin R.L. Tectonic evolution of the Salton Sea inferred from seismic reflection data // Nature Geoscience. 2009. V. 2. P. 581–584. <https://doi.org/10.1038/ngeo590>
- Brush R.M., Campbell C.D., Gay F., Patton S.B., Rockandel M., Williams R.E. NI 43–101 technical report for the definitive feasibility study for commercial lithium extraction plant at LANXESS South Plant. Prepared for Standard Lithium Ltd. Vancouver, 2023. 217 p. URL: https://d1io3yog0oux5.cloudfront.net/_e12729a50f616d58cd7c2cccd794fa27/standardlithium/files/pages/standardlithium/db/368/description/Phase1A_-_Definitive_Feasibility_Study_2023.10.18.pdf (15.11.2023)
- 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. <https://doi.org/10.3390/min10010068>
- Cawood P.A., Chowdhury P., Mulder J.A., Hawkesworth C.J., Capitanio F.A., Gunawardana P.M., Nebel O. Secular evolution of continents and the Earth system // Reviews of Geophysics. 2022. V. 60. Paper e2022RG000789. P. 1–67. <https://doi.org/10.1029/2022RG000789>
- Černý P., Ercit T.S. The classification of granitic pegmatites revisited // Canadian Mineralogist. 2005. V. 43. P. 2005–2026. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.6.2005>
- Christmann P., Gloaguen E., Labbé J.-F., Melleton J., Pian-tone P. Global lithium resources and sustainability issues // Lithium process chemistry: resources, extraction, batteries and recycling. Amsterdam: Elsevier, 2015. P. 1–40. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801417-2.00001-3>
- Coffey D.M., Munk, L.A., Ibarra, D.E., Butler, K.L., Boutt, D.F., Jenckes J. Lithium storage and release from lacustrine sediments: Implications for lithium enrichment and sustainability in continental brines // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2021. V. 22. Paper e2021GC009916. 22 p. <https://doi.org/10.1029/2021GC009916>

- Deng J., Wang Q., Li G. Tectonic evolution, superimposed orogeny, and composite metallogenic system in China // *Gondwana Research*. 2017. V. 50. P. 216–266. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.02.005>
- Dessemond C., Lajoie-Leroux F., Soucy G., Laroche N., Magnan J.-F. Spodumene: the lithium market, resources and processes // *Minerals*. 2019. V. 9. Paper 334. 17 p. <https://doi.org/10.3390/min9060334>
- Dèzes P., Schmid S.M., Ziegler P.A. Evolution of the European Cenozoic rift system: Interaction of the Alpine and Pyrenean orogens with their foreland lithosphere // *Tectonophysics*. 2004. V. 389(1–2). P. 1–33. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.06.011>
- Domeier M. Early Paleozoic tectonics of Asia: Towards a full-plate model // *Geoscience Frontiers*. 2018. V. 9. Iss. 3. P. 789–862. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.11.012>
- Dong S., Zhang Y., Li H., Shi W., Xue H., Li J., Huang S., Wang Y. The Yanshan orogeny and late Mesozoic multi-plate convergence in East Asia— Commemorating 90th years of the “Yanshan Orogeny” // *Science China Earth Sciences*. 2018. V. 61. P. 1888–1909. <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9297-y>
- 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. <https://doi.org/10.1017/S0016756816000716>
- Elming S.-A., Salminen J., Pesonen L.J. Paleo-Mesoproterozoic Nuna supercycle // *Ancient supercontinents and the paleogeography of Earth* (L.J. Pesonen, J. Salminen, S.-A. Elming, D.A.D. Evans, T. Veikkolainen – eds.). Elsevier, 2021. P. 499–548. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818533-9.00001-1>
- Evans K.R. Chapter 10 – Lithium // Gunn G. (ed.). *Critical metals handbook*. Hoboken, New Jersey, USA. Wiley-Blackwell. 2014. P. 230–260. <https://doi.org/10.1002/9781118755341.ch10>
- Gay F., Dworzanowski M., Brush R.M., Williams R.E., Mutschler C., Johnson D., Campbell C. NI 43-101 technical report for South West Arkansas project, pre-feasibility study. Lewisville, AR, 2023. 225 p. URL: https://d1io3yog0oux5.cloudfront.net/_4be41d2f-d2a14374236f411f0871932/standardlithium/files/pages/standardlithium/db/369/description/South_West_Arkansas_Project_-_Pre-Feasibility_Study_2023.09.18.pdf (15.11.2023)
- Grew E.S., Bosi F., Ros L., Kristiansson P., Gunter M.E., Hålenius U., Trumbull R.B., Yates M.G. Fluor-elbaite, lepidolite and Ta–Nb oxides from a pegmatite of the 3000 Ma Sinceni Pluton, Swaziland: evidence for lithium–cesium–tantalum (LCT) pegmatites in the Mesoarchean. *European J. Mineralogy*. 2018. V. 30 (2). P. 205–218. <https://doi.org/10.1127/ejm/2017/0029-2686>
- Grew E.S., Hystad G., Toapanta M.P.C., Eleish A., Ostroverkhova A., Golden J., Hazen R.M. Lithium mineral evolution and ecology: comparison with boron and beryllium // *European J. Mineralogy*. 2019. V. 31. P. 755–774. <https://doi.org/10.1127/ejm/2019/0031-2862>
- Gruber P.W., Medina P.A., Keoleian G.A., Kesler S.E., Everson M.P., Wallington T.J. Global lithium availability: A constraint for electric vehicles? // *J. Industrial Ecology*. 2011. V. 15(5) P. 760–775. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00359.x>
- Harris P.D., Robb L.J., Tomkinson M.J. The nature and structural setting of rare-element pegmatites along the northern flank of the Barberton greenstone belt, South Africa // *South Afr. J. Geology*. 1995. V. 98. P. 82–94.
- Hazen R.M., Liu X.-M., Downs R.T., Golden J., Pires A.J., Grew E.S., Hystad G., Estrada C., Sverjensky D.A. Mineral evolution: Episodic metallogensis, the supercontinent cycle, and the coevolving geosphere and biosphere // *SEG Special Publication 18*. 2014. P. 1–15. <https://doi.org/10.5382/SP.18.01>
- Hessler A.M., Lowe D.R. Weathering and sediment generation in the Archaean: An integrated study of the evolution of siliciclastic sedimentary rocks of the 3.2 Ga Moodies Group, Barberton Greenstone Belt, South Africa // *Precambrian Research*. 2006. V. 151. P. 185–210. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.08.008>
- Hofmann A. The geochemistry of sedimentary rocks from the Fig Tree Group, Barberton greenstone belt: Implications for tectonic, hydrothermal and surface processes during mid-Archaean times // *Precambrian Research*. 2005. V. 143. P. 23–49. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2005.09.00>
- Holland H.D. The oxygenation of the atmosphere and oceans // *Philosoph. Trans. Royal Society B: Biological Sciences*. 2006. V. 361(1470), P. 903–915. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1838>
- Jaskula B.W. Lithium. 2018 Minerals Yearbook. Reston: U.S. Geological Survey, 2022. 11 p.
- Jaskula B.W. Lithium // *Mineral Commodity Summaries 2023*. Reston: U.S. Geological Survey, 2023. P. 108–109. <https://doi.org/10.3133/mcs2023>
- Huff G.F. Evolution of Li-enriched oilfield brines in Devonian carbonates of the south central Alberta Basin, Canada // *Bull. Canadian Petroleum Geology*. 2016. V. 64(3). P. 438–448. <https://doi.org/10.2113/gscpgbull.64.3.438>
- Kavanagh L., Keohane J., Garcia Cabellos G., Lloyd A., Cleary J. Global lithium sources – industrial use and future in the electric vehicle industry: A review // *Resources*. 2018. V. 7. Paper 57. 29 p. <https://doi.org/10.3390/resources7030057>

- Kesler S.E., Gruber P.W., Medina P.A., Keoleian G.A., Everson M.P., Wallington T.J.* Global lithium resources: relative importance of pegmatite, brine and other deposits // *Ore Geology Reviews*. 2012. V.48. P. 55–69. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.05.006>
- Kuhn K., Schultheis B.* Preliminary economic assessment for the revised Zinnwald Lithium Project. Technical report prepared for Deutsche Lithium GmbH. September 2022. Freiberg, Germany. 222 p. URL: <https://wp-zinnwald-lithium-2020.s3.eu-west-2.amazonaws.com/media/2022/09/PEA-for-the-revised-Zinnwald-Lithium-Project-6th-September-2022.pdf> (15.08.2023)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.05.046>
- Li C., Li Z., Wu T., Luo Y., Zhao J., Li X., Yang W., Chen X.* Metallogenic characteristics and formation mechanism of Naomugeng clay-type lithium deposit in central Inner Mongolia, China // *Minerals*. 2021. V. 11(3). Paper 238. 19 p. <https://doi.org/10.3390/min11030238>
- Li J., Yan Q., Li P., Jacobson M.I.* Formation of granitic pegmatites during orogenies: Indications from a case study of the pegmatites in China // *Ore Geology Reviews*. 2023. V. 156. Paper 105391. 16 p. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105391>
- Li L., Deshmane V.G., Paranthaman M.P., Bhavne R., Moyner B.A., Harrison S.* Lithium recovery from aqueous resources and batteries: A brief review // *Johnson Matthey Technology Review*. 2018. V. 62(2). P. 161–176. <https://doi.org/10.1595/205651317X696676>
- Li Z.X., Bogdanova S.V., Collins A.S., Davidson A., De Waele B., Ernst R.E., Fitzsimons I.C.W., Fuck R.A., Gladkochub D.P., Jacobs J., Karlstrom K.E., Lu S., Natapov L.M., Pease V., Pisarevsky S.A., Thrane K., Vernikovsky V.* Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis // *Precambrian Research*. 2008. V. 160. P. 179–210. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.021>
- Li Z., Liu Y., Ernst R.* A dynamic 2000–540 Ma Earth history: from cratonic amalgamation to the age of supercontinent cycle // *Earth Science Reviews*. 2023. V. 238. Paper 104336. 45 p. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104336>
- Linnen R.L., Cuney M.* Granite-related rare-element deposits and experimental constraints on Ta-Nb-W-Sn-Zr-Hf mineralization // *Geological Association of Canada Short Course Notes*. V.17. 2005. P. 45–68.
- Liu C., Runyon S.E., Knoll A.H., Hazen R.M.* The same and not the same: Ore geology, mineralogy and geochemistry of Rodinia assembly versus other supercontinents // *Earth-Science Reviews*. 2019. V. 196. Paper 102860. 33 p. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.05.004>
- Liu Y., Ma B., Lü Y., Wang C., Chen Y.* A review of lithium extraction from natural resources // *International J. Minerals, Metallurgy and Materials*. 2023. V. 30 (2). P. 209–224. <https://doi.org/10.1007/s12613-022-2544-y>
- Makutu D.K., Seo J.H., Lee I., Oh J., Kang P., Ongendangenda A.T., Makoka F.M.* Magmatic-hydrothermal fluid processes of the Sn-W granites in the Maniema province of the Kibara Belt (KIB), Democratic Republic of Congo // *Minerals*. 2023 V. 13. Paper 458. 36 p. <https://doi.org/10.3390/min13040458>
- McCauley A., Bradley D.C.* The global age distribution of granitic pegmatites // *Canadian Mineralogist*. 2014. V. 52. P. 183–190. <https://doi.org/10.3749/canmin.52.2.183>
- Merriman R.J., Breward N., Stone P., Green K., Kemp S.* Element mobility and low-grade metamorphism of mudrocks in British Caledonian Basins. British Geological Survey Internal Report, OR/09/017. Keyworth, Nottingham: BGS, 2009. 28p.
- Munk L.A., Hynek S.A., Bradley D.C., Boutt D., Labay K., Jochens H.* Lithium brines: a global perspective // *Rare earth and critical elements in ore deposits* (P.L. Verplanck, M.W. Hitzman — eds.). *Reviews in Economic Geology*. V. 18. 2016. P. 339–365. <https://doi.org/10.5382/rev.18.14>
- Ober J.A.* Lithium // *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries* 2001. Reston: USGS, 2001. P. 96–97.
- Pesonen L.J., Evans D.A.D., Veikkolainen T., Salminen J., Elming S.-A.* Precambrian supercontinents and supercycles—an overview // *Ancient supercontinents and the paleogeography of Earth* (L.J. Pesonen, J. Salminen, S.-A. Elming, D.A.D. Evans, T. Veikkolainen — eds.). Elsevier, 2021. P. 1–50 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818533-9.00020-5>
- Riordan J.J., Thompson D.A., Coetzee V.E., Nupen S.* Falchani lithium project NI 43-101 technical report — preliminary economic assessment. Prepared for Plateau Energy Metals Inc. Perth: DRA Pacific, 2020. 228 p. URL: <https://www.sedar.com> (11.04.2023)
- Roberts N.M.W.* The boring billion? — Lid tectonics, continental growth and environmental change associated with the Columbia supercontinent // *Geoscience Frontiers*. 2013. V. 4(6). P. 681–691. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.05.004>
- Rogers J.J.W., Santosh M.* Continents and supercontinents. Oxford University Press, 2004. 304 p.
- Salminen J., Pehrsson S., Evans D.A.D., Wang C.* Neoarchean — Paleoproterozoic supercycles // *Ancient supercontinents and the paleogeography of Earth* (L.J. Pesonen, J. Salminen, S.-A. Elming, D.A.D. Evans, T. Veikkolainen — eds.). Elsevier, 2021. P. 465–498. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818533-9.00014-X>

- Simmons W.B., Webber K.L., Falster A.U., Nizamoff J.W.* Pegmatology: Pegmatite mineralogy, petrology and petrogenesis. New Orleans: Rubellite Press, 2003. 176 p.
- Simmons W.B., Falster A.U., Freeman G.* The Plumbago North pegmatite, Maine, USA: a new potential lithium resource // *Mineralium Deposita*. 2020. V. 55. P. 1505–1510. <https://doi.org/10.1007/s00126-020-00956-y>
- Statista*. Projection of worldwide lithium demand from 2019 to 2030. March 4, 2022. URL: <https://www.statista.com/statistics/452025/projected-total-demand-for-lithium-globally/> (15.06.2023)
- Tang G.-J., Wyman D.A., Wang Q., Dan W., Ma L., Yang Y.-N.* Large-scale rare-metal pegmatite deposit formation driven by supercontinent assembly // *Geology*. 2023. V. 51(9). P. 880–884. <https://doi.org/10.1130/G51454.1>
- Tkachev A.V.* Evolution of metallogeny of granitic pegmatites associated with orogens throughout geological time // *Geological Society, London. Special Publications*. 2011. V. 350. Granite-related ore systems. P. 7–23. <https://doi.org/10.1144/SP350.3>
- Tkachev A.V., Rundqvist D.V., Vishnevskaya N.A.* Metallogeny of lithium through geological time // *Russian J. Earth Sciences*. 2018. V. 18. Paper ES6002. 13 p. <https://doi.org/10.2205/2018ES000635>
- Torsvik T.H., Domeier M., Cocks L.R.M.* Phanerozoic paleogeography and Pangea // *Ancient supercontinents and the paleogeography of Earth* (L.J. Pesonen, J. Salminen, S.-A. Elming, D.A.D. Evans, T. Veikkolainen – eds.). Elsevier, 2021. P. 577–604. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818533-9.00003-5>
- Trumbull R.B.* Tin mineralization in the Archean Sinceni rare element pegmatite field, Kaapvaal craton, Swaziland // *Economic Geology*. V. 90 (3). 1995. P. 648–657. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.3.648>
- Vikström H., Davidsson S., Höök M.* Lithium availability and future production outlooks // *Appl. Energy*. Elsevier Ltd, 2013. V. 110. P. 252–266. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.005>
- Vulcan Energy Resources Ltd.* Vulcan Zero Carbon Lithium project: Phase one DFS results and resources-reserves update. ASX release 13 February 2023. 110 p. URL: <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/e617fca6-6d4.pdf> (15.05.2023)
- Wise M.A., Müller A., Simmons W.B.* A proposed new mineralogical classification system for granitic pegmatites // *Canadian Mineralogist*. 2022. V. 60. P. 229–248. <https://doi.org/10.3749/canmin.1800006>
- Yang H., Xu W.L., Sorokin A.A., Ovchinnikov R.O., Wu H.R., Long X.Y.* Bureya–Jiamusi–Khanka superterrane linked to the Kuunga–Pinjarra interior orogen of East Gondwana and its drift toward Northeast Asia // *GSA Bulletin*. 2023. 19 p. <https://doi.org/10.1130/B36758.1>
- Zhang B., Qi F., Gao X., Li X., Shang Y., Kong Z., Jia L., Meng J., Guo H., Fang F., Liu Y., Jiang X., Chai H., Liu Z., Ye X., Wang G.* Geological characteristics, metallogenic regularity, and research progress of lithium deposits in China // *China Geology*. 2022. V. 5(4). P. 734–767. <https://doi.org/10.31035/cg2022054>
- Zhao J.X., He C.T., Qin K.Z., Shi R.Z., Liu X.C., Hu F.Y., Yu K., Sun Z.H.* Geochronology, source features and the characteristics of fractional crystallization in pegmatite at the Qongjiagang giant pegmatite-type lithium deposit, Himalaya, Tibet // *Acta Petrologica Sinica*. 2021. V. 37(11). P. 3325–3347 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2021.11.06>
- Zhou J., Su H.* Site and timing of substantial India–Asia collision inferred from crustal volume budget // *Tectonics*. 2019. V. 38. P. 2275–2290. <https://doi.org/10.1029/2018TC005412>

LITHIUM DEPOSITS FROM THE MESOARCHEAN TO PRESENT: THEIR TYPES, DISTRIBUTION IN GEOLOGICAL TIME, EXPLORED RESOURCE BASE

A. V. Tkachev ^{a,*}, N. A. Vishnevskaya^a, and E. I. Chesalova^a

^a*Vernadsky State Geological Museum, Russian Academy of Sciences (SGM RAS),*

11, bld. 11, Mokhovaya Str., Moscow, 125009 Russia

**E-mail: a.tkachev@sgm.ru*

The distribution of lithium deposits and lithium resources contained in them are analyzed throughout geological time. The basis for the analysis is data on 164 deposits from around the world with resources estimated above 100 thousand tons of Li₂O, representing almost the entire explored resource base attractive in the modern and near future conditions to extract this element. The variability of various aspects of their formation in geological time is demonstrated by comparing supercontinent cycles in terms of the quantity and quality of resources in deposits of different types, ages, and tectonic position. It has been established that lithium deposits have an extremely uneven pulsed distribution on the geological time scale. The Kenoran, Columbian, and Rodinian cycles are represented only by the pegmatite type deposits, which intensity of formation decreased in this row. In the Pangean cycle, it increased again, approaching the Kenoran level. In addition, the first deposits of a granite type appeared. In the current Amasian cycle, deposits of the granite type quantitatively predominate over the pegmatite type, but they both yield quantitatively to the clay type deposits only appeared in this cycle. In terms of the resources, all these three types with solid ores are inferior to deposits associated with brines in salars, geothermal and oil-and-gas fields. All deposits from the Kenoran to Pangean cycles were formed in collision belts at the post-orogenic stage of their development. In the Amasian cycle, continuity in this aspect was preserved, but deposits of granite and clay types formed in the back zones of active continental margins were also established. Deposits in salars also have these two tectonic positions. Geothermal deposits are known within the framework of collisional orogens and on active continental margins. Oil-and-gas fields have been explored only in the sedimentary covers of ancient platforms. Currently, objects of pegmatite and salar types are of maximum importance for the world economy, and the granite type deposits are of less significance. All of them are traditional for lithium extraction. In the pegmatite type, the Kenoran deposits have the highest degree of industrial development, in the granite type – deposits of the Amasian cycle. In recent years, single deposits of clay, geothermal and oil-and-gas field types began to be involved in the exploitation, as well as representatives of the salar type with brine compositions that have not been suitable for conventional technologies.

Key words: lithium deposits, lithium metallogeny, rare-metal granite pegmatite, Li–F granite, lithium–bearing clayey rock, brine, supercontinent cycle