

УДК 553.412:551.24.031

ГЛАВНЫЕ ГЕОИСТОРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛОГЕНИИ ЛИТИЯ

А. В. Ткачев*, академик РАН Д. В. Рундквист, Н. А. Вишневская

Поступило 16.04.2018 г.

Проведён анализ металлогении Li на протяжении геологической истории. Основой для анализа послужила глобально распределённая выборка литиевых месторождений (71 объект), в которых сосредоточены практически все промышленно значимые или потенциально экономически интересные ресурсы Li. Установлено, что они формировались в разные геологические эпохи от позднего мезоархея до голоцена. Распределение их ресурсов на шкале геологического времени имеет ярко выраженный дискретный характер. В кенорский, колумбийский, родинийский суперконтинентальные циклы формировались только пегматитовые месторождения Li. В пангейском цикле основные ресурсы также связаны с пегматитовыми месторождениями, но часть локализована в литий-фтористых редкометалльных гранитах. В незавершённом амазийском цикле главную роль в ресурсной базе играют салары геодинамически активных областей при многократно меньшем значении эпитермальных стратиформных залежей, пегматитов и литий-фтористых гранитов.

Ключевые слова: металлогения, месторождения лития, геологическая история, суперконтинентальный цикл.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524842200-205>

Литий — очень важный для инновационной экономики вид минерального сырья, использование которого постоянно растёт вместе с развитием ряда современных отраслей промышленности [1]. Вследствие этого усилился интерес к данному виду сырья со стороны геологоразведочных компаний и служб во многих странах, начавших намного более активно реализовывать поисково-оценочные и разведочные проекты на ранее известных и вновь выявленных проявлениях Li на всех обитаемых континентах. Аналогичные тенденции отмечены и в количестве научных публикаций, рассматривающих литиевую проблематику на разных уровнях от отдельного месторождения до глобального анализа ([1–5] и ссылки в них). При том, что вопросы типовой принадлежности, геологического возраста, размещения важнейших месторождений мира в этих и ряде других исследований в какой-то степени затрагивались, практически не было дано стройной картины истории накопления промышленно интересных аккумуляций Li в земной коре и относительной роли каждого из известных типов месторождений в разные геологические эпохи. Отметим только диаграмму распределения ресурсов Li в пегматитовых

месторождениях [6]. Однако она сделана по очень скромной выборке (20 объектов с большим шагом обобщения данных (100 млн лет)) и поэтому получилась неполной, недостаточно детализированной. Для других типов месторождений Li такой работы не проводили. Предлагаемая работа заполняет в значительной мере указанные пробелы в знаниях о металлогении Li на основе анализа более объёмной и актуальной информации.

В настоящее время к категории промышленных типов месторождений Li, т. е. тех типов, которые уже служат источником получения данного сырья или попадут в эту категорию в ближайшее время, так как находятся в стадии активного освоения, относятся только четыре типа: гранитные пегматиты, литий-фтористые (Li–F) редкометалльные граниты, эпитермальные стратиформные залежи, рассолы (рапа) пересохших или сезонно пересыхающих соляных озёр — саларов [1–4]. В качестве перспективных источников Li иногда также рассматривают подземные воды нефтяных полей и геотермальные воды. Однако до сих пор ни на одном из подобных объектов работы не продвинулись дальше экспериментальных полупромышленных испытаний. Поэтому их в нашем анализе не учитывали.

Фактологической основой для проведения исследований послужили сведения из базы данных “Крупные и суперкрупные месторождения мира” (БД КСКМ), созданной и постоянно

Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского
Российской Академии наук, Москва

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

пополняемой в ГГМ РАН. Её ВЕБ-ГИС-версия общедоступна через интернет [7]. В выборку для анализа были включены месторождения, ресурсная оценка которых (включая прошлую добычу, если она была) не менее 0,1 млн т Li_2O . При создании выборки КСКМ с твёрдофазовыми рудами был принят нижний лимит среднего содержания 0,6% Li_2O , что отвечает значению, при котором к таким объектам зафиксирован практический интерес. Для объектов гидроминерального сырья в саларах такого лимита нет, так как из-за меньших эксплуатационных затрат их обрабатывают при многократно более низких содержаниях.

Всего в выборке 71 КСКМ Li со всех обитаемых континентов. На основании данных об их возрасте они были распределены по суперконтинентальным циклам, геохронологические границы которых обоснованы авторами ранее [8].

Оказалось, что наибольшее количество КСКМ Li и их суммарных ресурсов связано с самым молодым, ещё не завершённым амазийским циклом (табл. 1). Вместе с тем именно для него установлено наименьшее среднее значение концентрации Li в первичном сырье месторождений. Такая картина с содержаниями полезного компонента в ресурсах этого цикла сохраняется даже при исключении из выборки ресурсов, находящихся в рапе саларов, чьих аналогов по понятным причинам нельзя найти среди объектов более ранних периодов. Второе место по числу КСКМ и количеству интегральных ресурсов занимает наиболее древний кенорский цикл. Его ресурсы отличаются самым высоким средним содержанием полезного компонента. Если учитывать КСКМ только с твёрдофазовыми рудами, то этот цикл — лидер почти по всем параметрам.

Наименьшим числом КСКМ при наибольшем значении среднего размера ресурсов выделяется родинийский цикл, а наименьшим количеством ресурсов в сумме и в среднем приходящимся на один объект — колумбийский.

Для определения важнейших периодов накопления Li в его КСКМ и определения роли различных типов месторождений в разные эпохи данные их выборки были распределены на шкале геологического времени, сегментированной на хронокластеры по 50 млн лет (рис. 1), а полученные данные обобщены по суперконтинентальным циклам (табл. 2).

Кенорский цикл представлен исключительно КСКМ пегматитового типа. Примечательно, что самые древние из известных проявлений литиевой минерализации, с бедными рудами и малым масштабом их накопления, также принадлежат к этому типу [9, 10]. Их возрастные оценки 2,99–3,08 млрд лет (рис. 1). Пегматитовые КСКМ, представляющие экономический интерес и отвечающие предложенным здесь лимитам количества и качества сырья, появились, по-видимому, только в конце мезоархея. В аналитической выборке они представлены объектами, найденными на кратоне Пилбара—Пилгангура и Воджина.

Неоархейские КСКМ количественно намного превосходят мезоархейские, и география их распространения гораздо шире. Наибольшее их количество выявлено в гранит-зеленокаменно-сланцевых поясах кратона Сьюпериор: Танко, Лакорн, Джеймс-Бэй и др. Они также установлены в аналогичных по своей природе поясах на кратонах Слейв (Йеллоунайф-Большой), Йилгарн (Гринбушес, Эрл-Грей, Маунт-Марион и др.), Зимбабве (Бикита, Аркадия, Зулу), Кольском (Колмозерское, Полмостундровское).

Таблица 1. Распределение интегральных ресурсов КСКМ Li по суперконтинентальным циклам, млн т Li_2O

Суперконтинентальный цикл, млрд лет	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>R</i> _{ср}	<i>C</i>	<i>X</i>	<i>x</i>
Кенорский (> 2,25)	22	17,22	0,78	1,42	21,3	35,2
Колумбийский (1,35–2,25)	7	2,44	0,35	1,05	3,0	5,0
Родинийский (0,75–1,35)	2	7,70	3,85	1,19	9,5	15,7
Пангейский (0,19–0,75)	15	10,58	0,71	1,28	13,1	21,6
Амазийский (< 0,19)	25/9	42,94/11,04	1,72/1,23	0,15/0,96	53,1	22,5
Все циклы	71/55	80,89/48,99	1,14/0,89	0,69/1,25	100,0	100,0

Примечание. *N* — количество КСКМ; *R* — их интегральные ресурсы (прошлая добыча + запасы + прогнозные ресурсы высокой достоверности); *R*_{ср} — количество ресурсов, приходящееся на одно КСКМ; *C* — средневзвешенное содержание Li_2O , %, *X* — доля цикла в ресурсной базе КСКМ Li в целом, %, *x* — то же без учёта гидроминерального сырья; в данных для амазийского цикла и итогам по всем циклам, в знаменателе приведены значения без учёта КСКМ “жидких руд” в саларах, %.

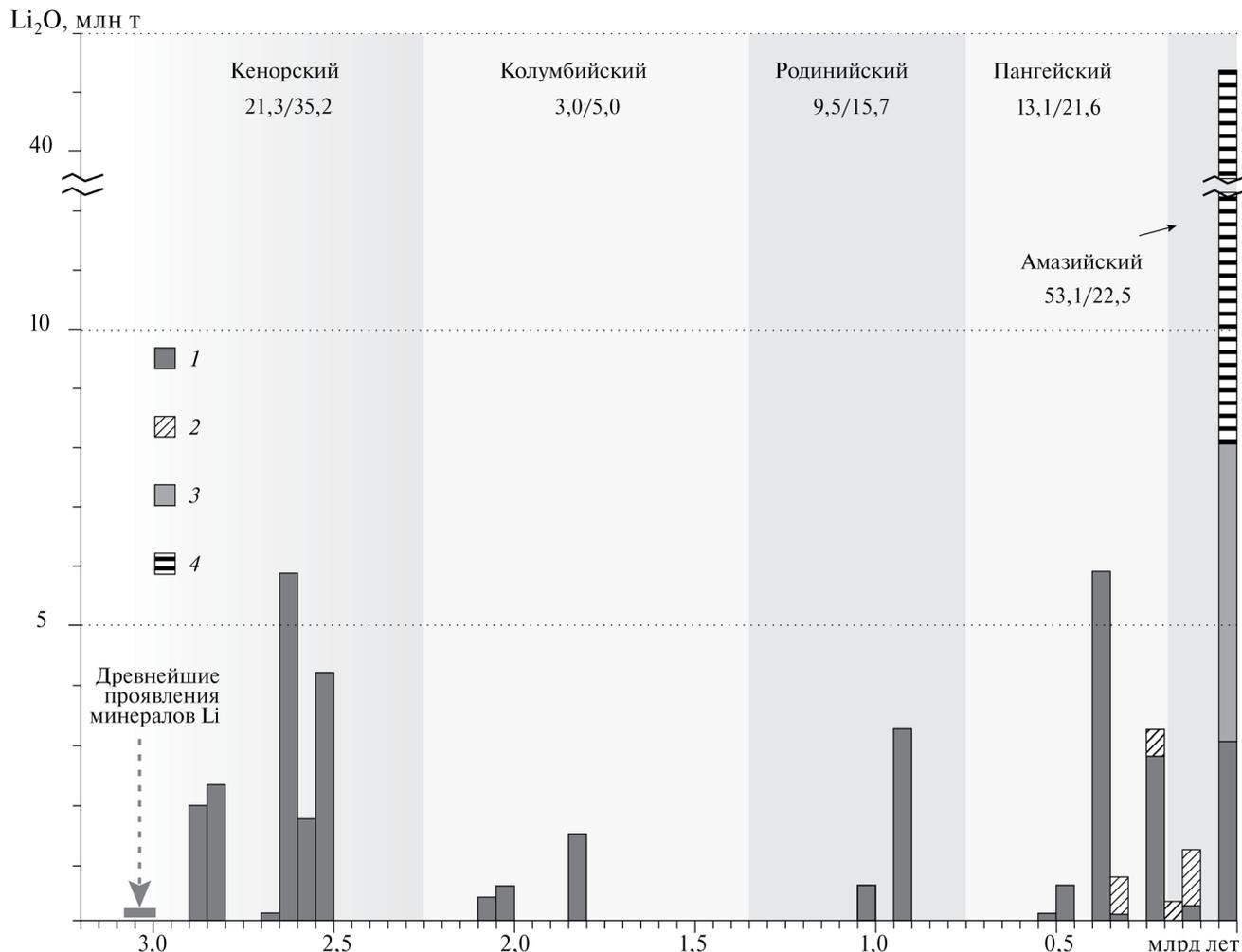


Рис. 1. Распределение ресурсов КСКМ Li на оси геологического времени. Числа под названиями суперконтинентальных циклов — процентные доли этих циклов в интегральных ресурсах объектов, попавших в анализируемую выборку: в числителе — от ресурсов всех объектов, в знаменателе — без учёта литиеносных рассолов в сарах. Для типов КСКМ: 1 — пегматиты, 2 — Li-фтористые редкометальные граниты, 3 — эпитермальные стратиформные залежи, 4 — сарары.

Таблица 2. Распределение по суперконтинентальным циклам интегральных ресурсов КСКМ Li разных типов

Цикл	Металлогенические типы КСКМ Li																			
	пегматиты					литий-фтористые граниты					эпитермальные залежи					сарары				
	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>R_{ср}</i>	<i>C</i>	<i>x'</i>	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>R_{ср}</i>	<i>C</i>	<i>x'</i>	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>R_{ср}</i>	<i>C</i>	<i>x'</i>	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>R_{ср}</i>	<i>C</i>	<i>x'</i>
Кенорский	22	17,22	0,78	1,42	100,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Колумбийский	7	2,44	0,35	1,05	100,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Родинийский	2	7,70	3,85	1,19	100,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Пангейский	12	9,50	0,79	1,39	89,8	3	1,08	0,36	0,77	10,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Амазийский	4	3,28	0,82	1,35	7,6	2	1,28	0,64	0,67	3,0	3	6,49	2,16	0,90	15,1	16	31,90	1,99	0,12	74,3
Все циклы	47	40,14	0,83	1,34	49,0	5	2,36	0,47	0,71	3,0	3	6,49	2,16	0,90	8,1	16	31,90	1,99	0,12	40,0

Примечание. *x'* — доля ресурсов данного типа КСКМ в суммарных ресурсах соответствующего суперконтинентального цикла; остальные обозначения в табл. 1.

В целом пегматитовые КСКМ кенорского цикла — самые многочисленные в своём типе, а также выделяются в нём наиболее высоким средним содержанием Li в рудах (табл. 2).

Колумбийский цикл также представлен только пегматитовыми КСКМ (табл. 2), возникшими в течение двух импульсов их формирования (рис. 1). Объекты в складчатых поясах Бразильского (Вольта-Гранде), Западно-Африканского (Гуламина), Украинского (Полоховское) щитов образовались в среднем палеопротерозое (2,03–2,08 млрд лет), а в Восточно-Саянском поясе (Гольцовое, Вишняковское и др.) — в позднем палеопротерозое (1,82–1,84 млрд лет). По всем параметрам ресурсы в пегматитовых КСКМ этого цикла уступают своим аналогам кенорского цикла, а по общему количеству выявленных ресурсов — и всем остальным циклам. По числу пегматитовых КСКМ колумбийский цикл превосходит только родинийский (табл. 2).

Родинийский цикл идентичен кенорскому и колумбийскому по однообразию КСКМ Li — все они пегматитовые (табл. 2; рис. 1). При этом цикл уступает всем циклам по общему числу объектов в выборке: выявлено всего два КСКМ этого периода — оба в гренвиллидах юга Центральной Африки: Манано-Китотоло в Кибарском поясе и Камативи в активизированном в конце мезопротерозоя кристаллическом массиве Дете-Камативи. Цикл превосходит, причём значительно, все остальные циклы только по среднему количеству ресурсов, приходящемуся на один объект. Это обусловлено тем, что выборка по циклу очень мала, а в неё входит второе среди крупнейших в мире месторождений Li Манано-Китотоло.

Пангейский цикл отличается от всех более древних циклов появлением в ряду анализируемых объектов КСКМ в Li–F-гранитах (табл. 2; рис. 1). Этот металлогенический тип в аспектах локализации (орогенные пояса), минерального и валового химического составов, в том числе и для элементов, определяющих рудоносность, имеет большое сходство с редкометальными пегматитами [11]. Однако локальные геологические условия залегания и морфологические особенности интрузий Li–F-гранитов, а также совокупность структурно-текстурных особенностей рудоносных зон заметно отличают их от пегматитов и дают основания рассматривать эти типы раздельно.

Известно о трёх КСКМ Li данного типа, возникших в пангейском цикле: Эшассьер в Центрально-Французском массиве, Циновец в Богемском массиве и Алахинское в Алтайском

поясе. Минералогия Li в каждом из них многофазна, но рудный потенциал каждого конкретного объекта всегда определяет какой-то один минерал: в первом — лепидолит, во втором — циннвальдит, в третьем — сподумен. В сумме эти три объекта дали только десятую часть интегральных ресурсов пангейского цикла (табл. 2). Накопление же основной доли ресурсов в нём снова предопределили пегматитовые КСКМ, наиболее значительные из которых установлены в орогенных поясах Аппалачском (Кингс-Маунтин и др.) и Сонпань-Ганьцзы (Цзяцзика и др.). Кроме того, они известны в поясах Арасуай (Кашуэйра), Иберийском (Сепеда), Алтайском (Коктогай), Тува-Монгольском (Тастыгское) и палеозоидах Альпийского (Вайнебене).

Амазийский цикл имеет свои особенности, которые затрудняют его по-настоящему объективное сравнение с остальными периодами геологической истории. Во-первых, он ещё далёк от завершения, т. е. в нём не прошли все фазы становления суперконтинента и главные события данной направленности только ожидаются в очень далёком будущем [12]. Во-вторых, сейчас доступны ресурсы Li в месторождениях, аналоги которых, если они существовали прежде, что очень вероятно, не могли сохраниться из-за своей фазовой природы — это рассолы в сalaraх. Такие КСКМ в нашей выборке содержат ~40% всех ресурсов и ~75% ресурсов амазийского цикла (табл. 1, 2).

Известно очень ограниченное число регионов мира, где локализируются литиеносные сalaraы: на плато Альтиплано-Пуна (Атакама, Уюни, Омбрэ-Муэрто и др.), провинции Бассейнов и Хребтов (Силвер-Пик, Сёрлз-Лейк), на Тибетском плато в бассейне Цайдам (Дачайдань и др.) и межгорных впадинах Лхасы (Цзабуе, Дансюнцо). Всё это — геодинамически активные области с разгружающимися на поверхность минерализованными геотермальными источниками, ярко выраженным аридным климатом и тектонически обусловленным рельефом, благоприятным для образования бессточных озёр [13].

Другой тип КСКМ Li, тоже присущий только амазийскому циклу и формирующий в нём вторую по величине ресурсной базы выборку, — эпитермальный стратиформный тип (табл. 2; рис. 1). В мире оценены только три подобных объекта: два гекторитовых в провинции Бассейнов и Хребтов (Кингс-Вэлли, Лавентана-Эльсаус) и один ядаритовый на Балканах (Ядар).

Пегматитовые КСКМ Li в амазийском цикле также известны, но только в двух поясах:

Забайкальском (Завитинское) и Гиндукушском (Парун и др.). Среди всех циклов именно в амазийском доля КСКМ данного типа в ресурсном потенциале минимальна (табл. 2). Отчасти это связано с гораздо большим типовым разнообразием КСКМ Li в нём, а отчасти — с очевидной его незавершённостью. Редкометалльные пегматиты, в том числе и литиеносные, образуются в кол-лапсирующих коллизионных орогенах [11]. Такие орогены наиболее интенсивно формируются на кульминационной стадии объединения ранее разрозненных сиалических блоков в гигантский суперконтинент [14]. Для будущего суперконтинента Амазия этот самый активный период образования коллизионных поясов ещё только в далёкой перспективе [12]. Возможно, что в этой же области аргументов следует искать объяснение и минимальному количеству пегматитовых КСКМ Li в родинийском цикле: степень дробления континентальной коры на всём его протяжении была минимальной, а потому и количество коллизионных орогенов, спаявших Родинию, было столь же аномально малым [15]. Соответственно и вероятность формирования пегматитовых КСКМ пропорционально ниже.

Наименьший вклад в ресурсный потенциал КСКМ Li в амазийском цикле внесли Li–F-граниты (табл. 2). Хотя их проявления в мезозое–кайнозое многочисленны и географически распространены очень широко, только два из них отвечают количественным лимитам, установленным в данном исследовании: Ичунь — разрабатываемое крупнейшее в мире месторождение лепидолитовых руд в Южно-Китайском поясе и Кестёр — только предварительно оценённое как литиевый объект, но потенциально — крупнейшее месторождение амблигонитовых (с лепидолитом) руд в Верхоянском поясе.

Таким образом, проведённый анализ глобально распределённых объектов, в которых заключены практически все промышленно значимые или потенциально интересные в этом аспекте ресурсы Li, показал, что они возникли в разные геологические эпохи в интервале от позднего мезоархея до голоцена. Размещение этих ресурсов на шкале геологического времени имеет ярко выраженный дискретный характер. При этом в кенорский, колумбийский, родинийский циклы формировались только пегматитовые месторождения Li. В пангейском цикле основные ресурсы также связаны с пегматитовыми КСКМ, но часть локализована

в Li–F-гранитах. В незавершённом амазийском цикле главную роль в ресурсной базе играют салары, а оставшуюся четверть ресурсов обеспечивают эпитеральные залежи, пегматиты и Li–F-граниты.

Исследования выполнены при финансовой поддержке проектов № 0140–2019–0005 государственных работ ГГМ РАН (создание базы данных и ГИС) и № 0140–2019–0005 по программе № 48 ФНИ Президиума РАН (анализ и синтез информации).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Christmann P., Gloaguen E., Labbé J.-F., et al.* Chapter 1 — Global Lithium Resources and Sustainability Issues. In: *Lithium Process Chemistry: Resources, Extraction, Batteries and Recycling*. Amsterdam: Elsevier, 2015. P. 1–40.
2. *Лунде Т. П., Ставров О. Д., Юшко Н. А. и др.* Литий России: состояние, перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы // *Минерал. сырьё*. Сер. геол.-экон. 2000. № 6. 116 с.
3. *Evans K. R.* Chapter 10 — Lithium. *Critical Metals Handbook*. Hoboken (N.J.): Wiley/Blackwell, 2014. P. 230–260.
4. *Kesler S. E., Gruber P. W., Medina P. A., et al.* // *Ore Geol. Rev.* 2012. V. 48. P. 55–69.
5. *Li J., Zou T., Liu X., et al.* // *Acta Geol. Sin.* 2015. V. 89. P. 652–670.
6. *McCauley A., Bradley D. C.* // *Canad. Mineral.* 2014. V. 52. P. 183–190.
7. *Ткачев А. В., Булов С. В., Рундквист Д. В. и др.* // *Геоинформатика*. 2015. № 1. С. 47–59.
8. *Ткачев А. В., Рундквист Д. В.* // *Геология руд. месторождений*. 2016. Т. 58. № 4. С. 295–318.
9. *Harris P. D., Robb L. J., Tomkinson M. J.* // *South Afr. J. Geol.* 1995. V. 98. № 1. P. 82–94.
10. *Trumbull R. B.* // *Precamb. Res.* 1993. V. 61. P. 89–116.
11. *Tkachev A. V.* Evolution of Metallogeny of Granitic Pegmatites Associated with Orogens Throughout Geological Time. // *Geol. Soc. London. Spec. Publ.* 2011. V. 350. P. 7–23.
12. *Duarte J. C., Schellart W. P., Rosas F. M.* // *Geol. Mag.* 2018. V. 155. № 1. P. 45–58.
13. *Ткачев А. В., Романюк Т. В.* // *Бюл. МОИП. Отд. геол.* 2010. Т. 85. В. 1. С. 27–47.
14. *Rogers J. J. W., Santosh M.* *Continents and Supercontinents*. Oxford: Oxford Univ. Press, 2004. 304 p.
15. *Bradley D. C.* // *Earth-Sci. Rev.* 2008. V. 91. P. 1–26.

THE MAIN FEATURES OF LITHIUM METALLOGENY IN GEOLOGICAL TIME

A. V. Tkachev, Academician of the RAS D. V. Rundqvist, N. A. Vishnevskaya

Received April 16, 2018

This paper reports on lithium metallogeny in geological time. The geochronological analysis was conducted on the basis of data on 71 lithium deposits distributed globally. These deposits contain almost all Li resources, which are industrially significant and of potential interest in terms of the economy. It was established that these deposits were formed in different geological epochs, from the Late Mesoarchean to the Holocene. The distribution of their resources on the scale of geological time is distinctly discrete. In the Kenoran, Columbian, and Rodinian supercontinent cycles, only pegmatite deposits of lithium were formed. In the Pangean cycle, the main resources are also attributed to pegmatite deposits, but some of them are concentrated in lithium–fluorine rare-metal granites. In the incomplete Amasian cycle, salars of geodynamically active areas play a main role in the resource base; the epithermal stratiform deposits, pegmatites, and lithium fluorine-granites are of much less significance.

Keywords: metallogeny, lithium deposits, geological history, supercontinent cycle.