

венно на участке работ, а это давало преимущество своевременно и быстро корректировать поисковые работы в течение полевого сезона.

Еще одним полезным вспомогательным методом является просмотр распиленного каменного керна под бинокулярным микроскопом. В рудных интервалах золото вкраплено в виде неравномерно распределенных гнезд, в которых размерность золотин представлена в основном тонкими, пылевидными и тонкодисперсными классами крупности, количество включений золота в таких гнездах может достигать сотен зерен. Размеры таких гнезд сотые, десятые доли миллиметра, редко до 1 мм. При просмотре керна под бинокулярным микроскопом при определенном навыке такие гнезда уверенно диагностируются.

Проведенными работами установлено, что опираясь на апробированную нами на нескольких площадях Урала методику поисков золоторудных объектов, позволило локализовать на Вилюйской площади новое золоторудное месторождение.

Выводы

Полученные результаты поисковых работ на Вилюйской площади свидетельствуют о высоком потенциале старых золоторудных узлов Среднего Урала.

Правильно выстроенная стратегия и тактика поисков позволила более эффективно и рационально распределить объемы работ по поисковой площади, а также достичь высокой результативности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грязнов, О.Н. Рудоносные метасоматические формации складчатых поясов / О.Н. Грязнов. — М.: Недра, 1992.
2. Рамдор, П. Рудные минералы и их сростания / П. Рамдор. — М.: Иностранная литература, 1962.
3. Сазонов, В.Н. Основные золотопродуктивные и сопутствующие метасоматические формации Урала (геологическая позиция, зональность, минералогическая, химическая и текстурно-структурная трансформация эдуктов и прогностическое значение): Науч. Издание / В.Н. Сазонов, В.А. Коротеев. — Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2009.

© Коллектив авторов, 2018

Александров Владислав Владимирович // alvladislav@yandex.ru
Рыльков Сергей Александрович // ural@rosnedra.gov.ru
Кокорин Николай Петрович // ural@rosnedra.gov.ru
Зубков Алексей Иванович // ural@rosnedra.gov.ru
Кривко Татьяна Николаевна // ural@rosnedra.gov.ru

УДК 553.412:551.24.031

Ткачев А.В., Рундквист Д.В., Вишневецкая Н.А. (ГГМ РАН)

ЭВОЛЮЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ МЕТАЛЛОГЕНИИ ЛИТИЯ: ЭПОХИ НАКОПЛЕНИЯ, ТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ИХ ОСОБЕННОСТИ

Накопление ресурсов лития происходило с позднего мезоархея до голоцена. Процесс имел дискретный характер. В самых ранних суперконтинентальных циклах — кенорском, колумбийском и родинийском — возникали месторождения лития только пегматитового типа. Этот

*тип также основной в пангейском цикле, но небольшая часть ресурсов связана с Li-F гранитами. Текущий амазийский цикл наиболее разнообразен в типах месторождений лития: рассолы в сalaraх наиболее важны, а эпitherмальные стратиформные залежи, пегматиты и Li-F граниты имеют меньшее значение. **Ключевые слова:** металлогения, месторождения лития, геологическая история, суперконтинентальный цикл.*

Tkachev A.V., Rundkvist D.V., Vishnevskaya N.A. (SGM RAS)
EVOLUTIONAL ASPECTS OF THE LITHIUM METALLOGENY: PRODUCTIVE EPOCHS, MINERAL DEPOSIT TYPES AND THEIR SPECIFIC FEATURES

*The generation of lithium resources has been taking place since the Mesoarchean and is expressed as a discontinuous series of impulses of variable intensities. Pegmatite type alone represents the lithium metallogeny in three oldest supercontinent cycles — Kenoran, Columbian, and Rodinian. The type is also the main one in the Pangean cycle, but a small part of its resources is concentrated in Li-F granites. Current Amasian cycle is the most various in terms of lithium deposit types: lithium-bearing brines in salars is the main type, while epithermal stratiform lodes, pegmatites, and Li-F granites are less significant. **Keywords:** metallogeny, lithium deposits, geological history, supercontinent cycle.*

Введение

Литий — очень важный для инновационной экономики вид минерального сырья, использование которого в мире постоянно растет вместе с развитием целого ряда современных отраслей промышленности. Особенно увеличилось потребление этого элемента из-за валлообразного роста объемов производства литий-ионных батарей и аккумуляторов для мобильных телефонов, смартфонов, планшетов, ноутбуков и других электронных устройств бытового, аэрокосмического, военного и медицинского назначения, электрических и гибридных автомобилей, солнечных и ветровых электрогенераторов. Очень широко литий используется для производства стекла, керамики и стеклокерамики, промышленных смазок, пластмасс и шинной резины, в выплавке стали, алюминия и особо легких авиационных сплавов, создании систем охлаждения, осушения и очищения воздуха, изготовлении лекарств, получении трития и еще целом ряде других современных производств [8].

Акселерационные тенденции в потреблении лития привели к увеличению объемов его ежегодного извлечения из недр: в 2017 г. оно приблизилось к отметке 0,1 млн т в пересчете на Li₂O, что приблизительно втрое больше, чем на рубеже XX и XXI вв. (данные USGS — <https://minerals.usgs.gov>). Соответствующим образом усилился интерес к данному виду сырья со стороны геологоразведочных компаний и служб во многих странах мира, начавших активнее реализовывать поисково-оценочные и разведочные проекты как на ранее известных, так и вновь выявленных проявлениях лития на всех обитаемых континентах.

Аналогичные тенденции проявились и в количестве научных публикаций геологической, геолого-экономической и технологической направленности, рассматривающих литиевую проблематику на разных уровнях: от отдельного месторождения до глобального анализа [1, 8, 12]. При этом в этих и ряде других исследований вопросы типовой принадлежности, возраста и размещения важнейших месторождений мира в той или иной степени затрагивались, но ни в одной из них не было дано стройной картины истории накопления промышленно интересных аккумуляций лития в земной коре и относительной роли каждого из известных типов месторождений в разные геологические эпохи. Единственным и очень скромным продвижением в этом направлении исследований можно считать диаграмму распределения на шкале времени ресурсов лития, содержащихся в пегматитовых месторождениях [14]. Она создана на основе очень ограниченной и на текущий момент отчасти утратившей актуальность выборки объектов [12]. Шкала времени сегментирована на большие хронокластеры по 100 млн лет, а сама диаграмма почти никак в оригинальной статье не анализируется. Для других типов месторождений лития такие работы не делались вообще. Целью настоящей работы является в значительной мере заполнить основные пробелы в знаниях о геологических тенденциях в металлогении лития на основе наиболее актуальной и детализированной информации.

В настоящее время к категории промышленных типов месторождений лития, то есть тех типов, которые или уже служат источником получения данного сырья, или попадут в этот перечень в ближайшее время, так как находятся в стадии активного освоения, относятся только четыре: а) гранитные пегматиты, б) литий-фтористые (Li-F) редкометалльные граниты, в) эпитеральные стратиформные залежи, г) рапалы (рапа) пересохших или сезонно пересыхающих соляных озер — саларов [1, 8, 12].

В качестве перспективных источников лития в литературе также описаны геотермальные воды, циркулирующие в тех же геодинамически активных областях, где известны и литиеносные салары. Среди специалистов распространено мнение, что и рапа саларов и, вероятно, эпитеральные стратиформные залежи генетически связаны с деятельностью подобных геотермальных гидросистем [4, 8, 12]. Подземные воды нефтяных полей также числятся в ряду перспективных источников лития [1, 8]. Рапа саларов практически аналогична по фазово-химическому составу геотермальным и околонефтяным водам, но имеет более высокие содержания лития.

Это одна из основных причин того, что до сих пор ни на одном из гидроминеральных объектов иной природы, чем салары, работы не продвинулись дальше экспериментальных полупромышленных испытаний. Результаты последних работ нигде не были однозначно позитивными с точки зрения экономической рентабельности, и ни одно из подобных месторождений пока не было передано в промышленную эксплуатацию для добычи лития [8]. Именно поэтому подобные объекты нами в анализе не учитывались.

Фактологическая основа для анализа и методические подходы

Непосредственной основой для проведения исследований послужили сведения из базы данных «Крупные и суперкрупные месторождения мира» (БД КСКМ), созданной и постоянно пополняемой в ГГМ РАН, которая теперь общедоступна через интернет, благодаря созданию ее ВЕБ-ГИС-версии [6]. В выборку для анализа были включены месторождения, ресурсная оценка которых (включая прошлую добычу, если она была) составляет не менее 0,1 млн т Li_2O . При создании выборки КСКМ с твердофазовыми рудами был принят нижний лимит среднего содержания 0,6 % Li_2O , что отвечает уровню, 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 отработывают при многократно более низких содержаниях.

По итогам селекции в выборку попали 71 КСКМ со всего мира (рис. 1). Для геологического анализа они были распределены по суперконтинентальным циклам, геохронологические границы которых были обоснованы нами ранее [5].

Сравнение суперконтинентальных циклов в металлогении лития

Самые общие результаты распределения КСКМ лития и их ресурсов между суперконтинентальными циклами приведены в табл. 1. Наибольшее количество как объектов, так и ресурсов связано с самым молодым, еще не завершенным, амазийским циклом. При этом именно для него установлено наименьшее среднее зна-

Таблица 1
Распределение интегральных ресурсов КСКМ лития по суперконтинентальным циклам

| Суперконтинентальный цикл (млрд лет) | N | R | R_{cp} | C | X | x |
|--------------------------------------|-------|-------------|-----------|-----------|-------|-------|
| 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_{cp} — количество ресурсов, приходящееся на одно КСКМ, C — средневзвешенное содержание Li_2O в %, X — доля цикла в ресурсной базе КСКМ лития в целом, x — то же самое без учета гидроминерального сырья; в данных для амазийского цикла и для итога по всем циклам в знаменателе курсивом приведены значения без учета КСКМ гидроминерального типа

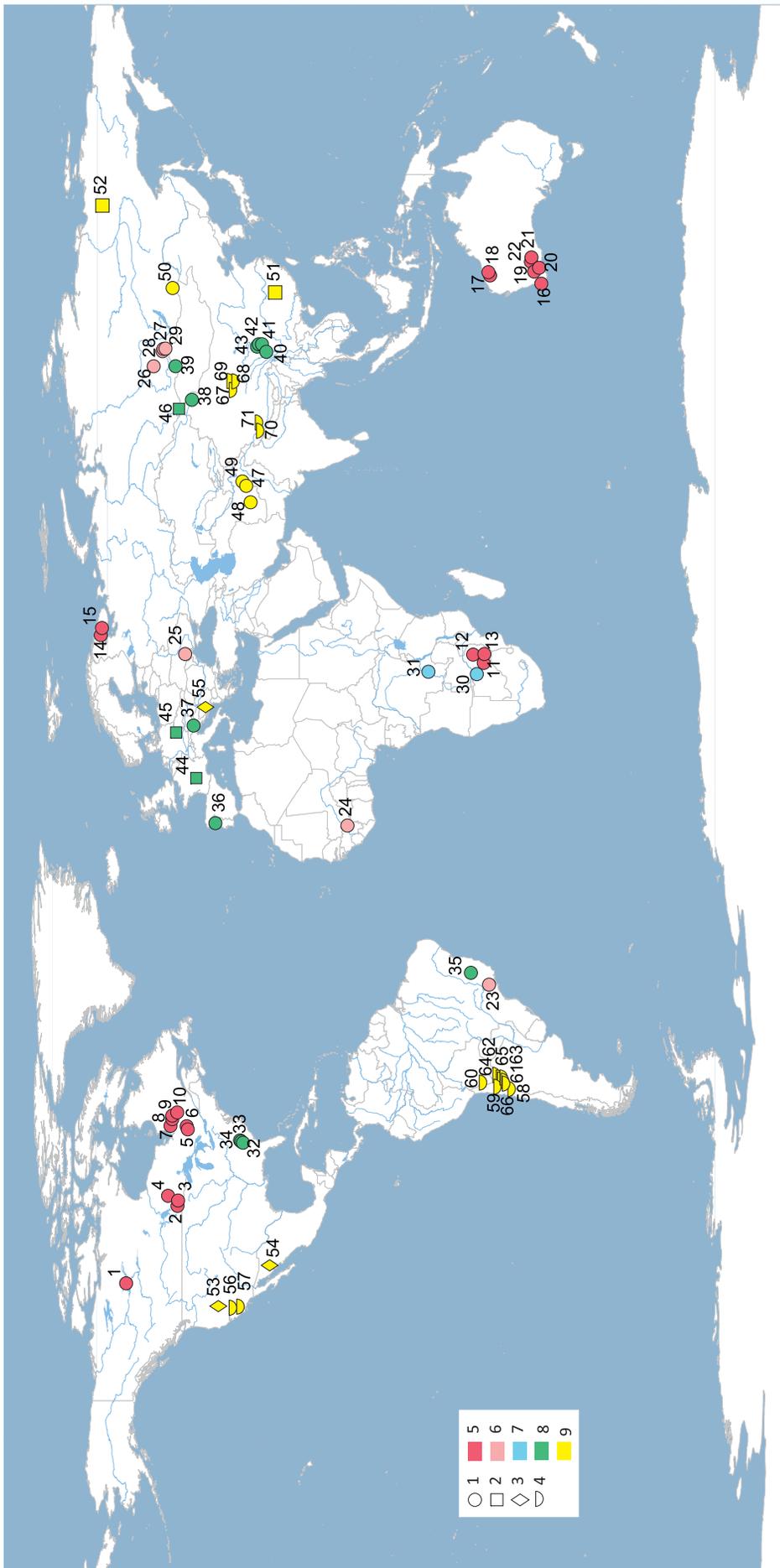


Рис. 1. Размещение КСКМ лития, вошедших в анализируемую выборку: 1–4 — типы КСКМ: 1 — гранитные пегматиты, 2 — Li-F редкометаллные граниты, 3 — эпитермальные стратиформные залежи, 4 — рапа в селарах; 5–9 — суперконтинентальные циклы: 5 — кенорский, 6 — колумбийский, 7 — родинийский, 8 — пангейский, 9 — амазийский. Месторождения (рудный парагенезис с убыванием извлекаемой ценности / возраст в млрд лет): 1 — Йеллоунайф-Большо (Li / 2.59), 2 — Танко (Li, Ta, Cs, Be, Sn / 2.64), 3 — Сепарейшн-Рэлида (Li, Rb, Ta / 2.64), 4 — Пакеагама-Лейк (Li, Ta, Cs, Rb / 2.67), 5 — Отье (Li / 2.65), 6 — Лакорн (Li / 2.65), 7 — Джеймс-Бэй (Li / 2.62), 8 — Роуз (Li, Ta, Rb, Cs, Be / 2.62), 9 — Вабуши (Li, Be / 2.58), 10 — Моблан (Li / 2.64), 11 — Зулу (Li, Ta / 2.61), 12 — Аркадия (Li, Ta / 2.59), 13 — Бикита (Li, Cs, Be, Ta, Sn / 2.62), 14 — Поллостундровское (Li, Ta, Be / 2.52), 15 — Колмозерское (Li, Ta, Be / 2.52), 16 — Гринбушес (Li, Ta, Sn, Nb / 2.53), 17 — Воджина (Li, Ta, Sn, Be / 2.83), 18 — Пилгангура (Li, Ta, Sn, Be / 2.88), 19 — Эрл-Грей (Li / 2.62), 20 — Маунт-Кэтлин (Li, Ta, Be, Cs / 2.62), 21 — Маунт-Мэрион (Li / 2.62), 22 — Болд-хилл (Li, Ta, Sn / 2.62), 23 — Вольтга-Гранде (Ta, Li, Sn / 2.03), 24 — Гуламина (Li / 2.08), 25 — Полоховское (Li, Sn, Ta, Rb, Be / 2.03), 26 — Вишняковское (Ta, Li, Sn, Be, Rb, Cs / 1.84), 27 — Белореченское (Li, Ta, Sn, Be / 1.83), 28 — Гольцовое (Li, Ta, Cs, Sn, Be / 1.83), 29 — Урикское (Li, Ta, Sn, Be / 1.83), 30 — Камативи (Sn, Li, Ta, Be / 1.04), 31 — Маноно-Китотоло (Li, Ta, Sn / 0.95), 32 — Кингз-Маунтин (Li, Sn, Ta, Be / 0.36), 33 — Холлман-Бим (Li, Sn, Ta, Be / 0.36), 34 — Линкольнтон (Li, Sn, Ta, Be / 0.50), 35 — Кашуэйра (Li, Ta, Sn / 0.50), 36 — Сепеда (Li, Sn / 0.31), 37 — Вайнебене (Li / 0.24), 38 — Коктогай (Li, Be, Ta / 0.21), 39 — Тастыгское (Li, Ta, Be, Sn, Nb / 0.49), 40 — Цяцзяка (Li, Be, Ta / 0.21), 41 — Елунгоу (Li, Ta, Be, Sn / 0.20), 42 — Лицзягоу (Li, Be, Sn, Ta / 0.20), 43 — Данба (Li, Ta / 0.20), 44 — Эшлассьер (Li, Ta, Sn, Be, W / 0.33), 45 — Циновец (Sn, Li, W / 0.32), 46 — Алахинское (Li, Ta / 0.20), 47 — Тагавлор (Li, Ta / 0.03), 48 — Шамакат (Li / 0.03), 49 — Парун (Li, Ta, Be / 0.03), 50 — Завитинское (Li, Ta, Sn, Be, W / 0.13), 51 — Ичунь (Li, Ta, Rb, Cs / 0.16), 52 — Кестер (Li, Sn, Rb, Cs / 0.14), 53 — Кингс-Вэлли (Li, K / 0.015), 54 — Лавентана-Эльсаус (Li, K, Rb, Cs / 0.02), 55 — Ядар (Li, W / 0.02), 56 — Силвер-Пик (Li), 57 — Сёрлз-Лейк (В, Li, W), 58 — Салар-де-Марикунга (Li, K), 59 — Салар-де-Атакама (Li, I, селитра, K, В), 60 — Салар-де-Уюни (Li, Mg, K, В), 61 — Салар-дель-Омбре-Муэрто (Li, В, K), 62 — Салар-дель-Ринкон (Li, K, Na), 63 — Салар-де-Диабильос (Li, K), 64 — Салар-де-Оларос (Li, K, В), 65 — Салар-де-Посуэло (Li), 66 — Салар-де-Рио-Гранде (Li), 67 — Иллипин — Тайцзинайэр (Li, В), 68 — Цархань (Li, K, В), 69 — Цзабуе (Li, K, В), 70 — Дансюнцэ (Li, В, K), 71 — Дансюнцэ (Li, В, K)

Таблица 2
Распределение по суперконтинентальным циклам интегральных ресурсов КСКМ лития разных типов

| Циклы | Металлогенические типы КСКМ лития | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------------------------|-------|-----------------|------|-------|-------------------------|------|-----------------|------|------|----------------------|------|-----------------|------|------|--------|-------|-----------------|------|------|
| | пегматиты | | | | | литий-фтористые граниты | | | | | эпитермальные залежи | | | | | салары | | | | |
| | N | R | R _{ср} | C | x' | N | R | R _{ср} | C | X | N | R | R _{ср} | C | X | N | R | R _{ср} | C | X |
| Кенорский | 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 см. в таблице 1

чение концентрации лития в первичном сырье месторождений. Такая картина с содержаниями в литиевых ресурсах этого цикла сохраняется даже при исключении из выборки гидроминерального сырья саларов, которое, по понятным причинам, нельзя найти в более ранних периодах. 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 твердофазовыми рудами, то этот цикл — лидер почти по всем параметрам (табл. 1). Наименьшим числом КСКМ при наибольшем значении среднего размера ресурсов выделяется родинийский цикл, а наименьшим количеством ресурсов как в сумме, так и в одном объекте в среднем — колумбийский.

Для более детального анализа собранные данные разделены по типам КСКМ (табл. 2), а их ресурсы распределены на шкале геологического времени, разделенной на сегменты по 50 млн лет (рис. 2). Полученные результаты очень выразительны.

Кенорский цикл представлен месторождениями исключительно пегматитового типа. Примечательно, что самые древние из известных проявлений литиевой минерализации (сподумен, лепидолит, холмквистит, литиевый мусковит, эльбаит), которые не вошли в выборку из-за бедности руд и малых масштабов их накопления, также принадлежат к объектам этого типа — это альбитовые и альбит-сподуменовые редкометалльные пегматиты комплекса Древних Гнейсов Свазиланда и гранит-зеленокаменного пояса Барбертон кратона Каапваль [3]. Их возраст варьирует в интервале 2,99–3,08 млрд лет (рис. 2). Пегматитовые КСКМ, представляющие эконо-

мический интерес и отвечающие предложенным лимитам количества и качества сырья, появились, по-видимому, только в конце мезоархея. В нашей выборке они представлены объектами с кратона Пилбара — Пилгангура и Воджина (рис. 1).

Неоархейские КСКМ количественно намного превосходят мезоархейские, и география их распространения гораздо шире. Наибольшее их количество (9) выявлено в гранит-зеленокаменно-сланцевых поясах кратона Сьюпериор: Танко, Лакорн, Джеймс-Бэй и др. (рис. 1). Также они установлены в аналогичных по своей природе поясах на кратонах Слейв (Йеллоунайф-Большой), Йилгарн (Гринбушес, Эрл-Грей, Маунт-Марион и др.), Зимбабве (Бикита, Аркадия, Зулу) и Кольском п-ве (Колмозерское, Полмостундровское).

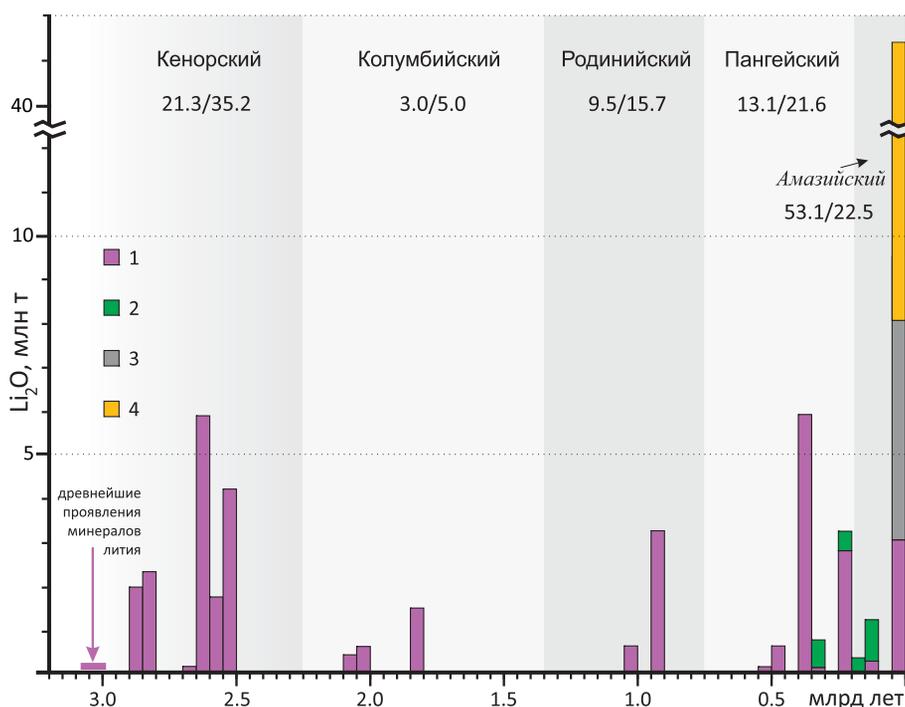


Рис. 2. Распределение ресурсов КСКМ на оси геологического времени. Числа под названиями суперконтинентальных циклов — доли (%) этих циклов в интегральных ресурсах объектов, попавших в анализируемую выборку: в числителе от ресурсов всех объектов, в знаменателе — без учета литиеносных рассолов в саларах. Условные обозначения для типов КСКМ: 1 — гранитные пегматиты, 2 — литий-фтористые редкометалльные граниты, 3 — эпитермальные стратиформные залежи, 4 — салары

Минералогия лития в пегматитовых месторождениях любого возраста всегда представлена несколькими минеральными фазами, но в большинстве случаев единственный интерес для его промышленного получения представляет только сподумен, являющийся или продуктом первичной кристаллизации из расплава, или результатом субсолидусного распада петалита. В кенорском цикле в нескольких объектах есть примеры экономически интересных аккумуляций и других минералов лития, для которых разработаны, а в ряде случаев и реализованы, технологические схемы получения отдельных от сподумена концентратов: амблигонита (Танко, Бикита), лепидолита (Бикита), петалита (Бикита, Зулу, Аркадия), эвкрипитита (Бикита). Месторождение Сепарейшн-Рэпидз представляет собой редкий пример месторождения лития, в котором сподумен не предполагается извлекать в отдельный концентрат — обязательно петалит и, вероятно, лепидолит.

Колумбийский цикл также представлен только пегматитовыми КСКМ (табл. 2). Они возникли в течение двух импульсов. Объекты в складчатых поясах Бразильского (Вольта-Гранде), Западно-Африканского (Гуламина) и Украинского (Полоховское) щитов образовались в среднем палеопротерозое (2,03–2,08 млрд лет), а КСКМ Восточно-Саянского пояса (Гольцовое, Вишняковское и др.) — в позднем палеопротерозое (1,82–1,84 млрд лет) (рис. 1, 2). В Полоховском месторождении практически весь извлекаемый литий сосредоточен в петалите. Технология получения петалитового и эвкрипититового концентратов, кроме сподуменного, разработана для Вишняковского месторождения [1]. В остальных КСКМ цикла экономически интересен только сподумен. Этот цикл уступает кенорскому по всем параметрам сравнения интегральных ресурсов, а по общему количеству ресурсов — и всем остальным циклам. Колумбийский цикл превосходит по количеству КСКМ только родинийский, а по среднему содержанию Li_2O в рудах — только амазийский (табл. 1, 2).

Родинийский цикл идентичен кенорскому и колумбийскому по однообразию КСКМ лития (табл. 2, рис. 2). При этом он уступает всем циклам по общему количеству объектов в выборке: выявлено всего два КСКМ этого периода. Они оба локализованы в грениллидах юга Центральной Африки: Манано-Китотоло в Кибарском поясе и Камативи в активизированном в конце мезопротерозоя кристаллическом массиве Дете-Камативи (рис. 1). Цикл превосходит, причем значительно, все остальные циклы только по среднему количеству ресурсов, приходящемуся на один объект. В значительной мере это обусловлено тем, что в выборку цикла входит второе среди крупнейших в мире месторождений лития Манано-Китотоло, которое по завершению геологоразведочных работ может стать даже первым. Выборка по циклу очень мала, что резко повышает вес экстраординарного значения при расчете среднего (табл. 1). В КСКМ цикла основной практический интерес представляет сподумен, хотя получение лепидолитового концентрата при отработке некоторых участков Манано-Китотоло тоже возможно.

Пангейский цикл представлен в выборке КСКМ лития заметно шире, чем колумбийский и родинийский. Он также превосходит их по доле в ресурсной базе всей выборки и среднему содержанию лития в рудах (табл. 1). Кенорскому же циклу он уступает по всем этим параметрам. Принципиальным его отличием от предшествующих циклов является появление Li-F редкометалльных гранитов среди промышленно интересных объектов (табл. 2, рис. 1, 2). Этот тип месторождений лития по внутрикоровому происхождению материнских магм, локализации в орогенных поясах на посторогенной стадии их развития, минеральному и валовому химическому составу, в том числе и для элементов, определяющих рудоносность, имеет значительное сходство с редкометалльными пегматитами. Однако локальные геологические условия залегания и морфологические особенности интрузий Li-F гранитов, а также совокупность структурно-текстурных особенностей рудоносных зон заметно отличают их от пегматитов и дают основания для выделения в особый тип месторождений редких металлов.

Известно о трех КСКМ лития данного типа, возникших в пангейском цикле: Эшассьер в Центрально-Французском массиве, Циновец в Богемском массиве и Алахинское в Алтайском поясе (рис. 1). Минералогия лития 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.

Накопление основной доли ресурсов в нем снова предопределили пегматитовые КСКМ (табл. 2), наиболее значительные из которых установлены в Аппалачском поясе (Кингс-Маунтин и др.) и поясе Сонпань-Ганьцзы (Цзяцзика и др.) (рис. 1). Кроме того, они известны в поясах Арасуай (Кашуэйра), Иберийском (Сепеда), Алтайском (Коктогай), Тува-Монгольском (Тастыгское) и палеозоидах Альпийского (Вайнебене). Только в Сепеда главный концентрат лития — петалит, в остальных — сподумен, а в Коктогае заметную роль также играет лепидолит.

Амазийский цикл имеет свои особенности, которые затрудняют по-настоящему его объективное сравнение с остальными периодами геологической истории. Во-первых, он еще далек от завершения, то есть в нем не прошли все фазы становления суперконтинента, и главные события данной направленности еще только ожидаются в очень далеком будущем. Во-вторых, сейчас доступны ресурсы лития в месторождениях, аналоги которых, если они существовали прежде, не могли в принципе сохраниться из-за своей фазовой природы — это рассолы в сарахах. Эти месторождения в нашей выборке содержат ~ 40 % всех ресурсов КСКМ и ~ 75 % в амазийском цикле (табл. 1, 2), а их доля в добыче лития составляет 50–60 % с начала XXI в. [8].

В обзорах по сырьевой базе мира можно встретить более значительную, чем приведено выше, долю данного типа месторождений в глобальных ресурсах. Рас-

хождения вполне объяснимы: а) нами использованы более свежие оценки для ряда месторождений твердофазовых руд, которые были с существенным ростом переоценены или даже впервые оценены по литию в последние 2–3 года (Пакеагама-Лейк, Джеймс-Бэй, Эрл-Грей, Манано-Китотоло, Циновец и др.); б) использованная в этой работе база данных КСКМ в ресурсной оценке саларов учитывает низкое сквозное извлечение лития из рапы в конечный продукт (~ 50 %) при поэтапной естественной эвапоритизации, которая лежит в основе соответствующих технологий, применяемых на большинстве из них.

Почти все промышленно интересные салары уже эксплуатируются или находятся в стадии освоения. Известно очень ограниченное число регионов мира, где они локализуются: на плато Альтиплано-Пуна (Атакама, Уюни, Омбрэ-Муэрто и др.), в провинции Бассейнов и Хребтов (Силвер-Пик, Сёрлз-Лейк), на Тибетском плато в бассейне Цайдам (Дачайдань, Цархань, Илипин-Тайцзинайэр) и межгорных впадинах Лхасы (Цзабуе, Дансюнцо) (рис. 1). Все это — геодинамически активные области с разгружающимися на поверхность минерализованными геотермальными источниками, ярко выраженным аридным климатом и тектонически обусловленным рельефом, благоприятным для образования бессточных озер [4].

Другим типом КСКМ лития, тоже присущим только амазийскому циклу и формирующим в нем вторую по величине ресурсной базы выборку, является эпитермальный стратиформный тип (табл. 2, рис. 2). Он самый малоизученный во всех аспектах, так как попал позже остальных типов в круг пристального интереса геологоразведочных и горнорудных компаний, занимающихся литием, а потому и в сферу повышенного внимания ученых. На текущий момент в мире оценены только три таких объекта. Все они выявлены в надсубдукционных окраинно-континентальных поясах, где локализованы в вулканогенно-осадочных разрезах озер, возникших на краю или вблизи вулканических кальдер на стадии затухания магматической активности. Генезис таких руд еще плохо изучен, но наиболее вероятно их эпигенетическая природа: литиеносные эпитермальные высокосоленные растворы метасоматизировали петрофизически и петрохимически благоприятные слои витрокластических туфов или борат-содержащих силикатно-карбонатных осадков [8, 12]. В зависимости от замещаемого субстрата формировались руды одного из двух минеральных подтипов: алюмосиликатный гекторитовый (гекторит плюс литиеносные разновидности иллита, каолинита и/или монтмориллонита) в провинции Бассейнов и Хребтов (Кингс-Вэлли и Лавентана-Эльсаус) или боросиликатно-боратовый (ядарит плюс колеманит, улесит, пробертит) в вулканогенно-осадочной депрессии Ядар на Балканах (рис. 1). Также их объединяет миоценовый возраст, пространственно-временная связь с центрами наземного высококалиевого вулканизма и нахождение в одних провинциях с крупнейшими в мире эпиконтинен-

тальными залежами боратов того же возраста. Последнее указывает на высокую вероятность существования в миоцене в районах их локализации бор-литиеносных саларов, так как почти все современные месторождения лития в соляных озерах являются одновременно и промышленными источниками бора [4]. Причем до открытия месторождения Ядар твердофазовые промышленные залежи бора и лития, совмещенные в общих рудных телах, не были известны. До этого события примером их максимальной пространственной близости был разрабатываемый позднемiocеновый пласт боратов месторождения Тинкалаю на берегу современного салара Омбре-Муэрто, из рапы которого извлекается и бор, и литий.

Присутствие бора и лития в рапе саларов, и экстраординарная редкость нахождения повышенных концентраций лития в боратовых рудах в континентальных эвапоритах косвенно указывают на разные пути их попадания в такие руды: бор, без сомнения, выпадает в осадок при эвапоритизации соленой озерной воды, в формировании солевой компоненты которой принимают участие излившиеся на поверхность эпитермальные растворы [4]. Литий, вероятно, фиксируется в твердых фазах (глинистых или боросиликатных) гораздо позже на постседиментационной стадии при взаимодействии захороненных осадков благоприятного состава и структуры и фильтрующихся через них эпитермальных растворов, аналогичных упомянутым выше, но еще не излившимся.

Парагенезис бора и лития в саларах геодинамически активных областей континентов дает основание предположить возможное существование литиеносных соляных озер уже в палеопротерозое после Великого Оксигенационного События (ВОС). Оно вызвало появление устойчивых концентраций свободного кислорода в атмосфере и верхнем слое гидросферы не позднее, чем 2,3 млрд лет назад [11]. Это, в свою очередь, отразилось на осадочном литогенезе, особенно на составе хемогенных толщ. В частности, в геологических формациях, накапливавшихся до ВОС, бороносные осадочные породы не известны. Древнейшие континентальные эвапориты с боратовыми рудами зафиксированы в вулканогенно-осадочных комплексах с возрастом ~2,2 млрд лет, но литиевая минерализация в них не описана [4]. Поэтому однозначно нельзя утверждать, что докайнозойские салары были не только бороносными, но также и литиеносными, как современные. Парагенезис руд бора и лития в континентальных вулканогенно-осадочных комплексах пока остается феноменом только миоцен-четвертичного периода развития Земли.

Пегматитовые КСКМ лития в амазийском цикле также известны, но только в двух металлогенических поясах (рис. 1): Забайкальском (Завитинское) и Гиндукушском (Парун и др.). Главный концентратор лития в них — сподумен. Среди всех циклов именно в амазийском доля КСКМ данного типа в ресурсном потенциале минимальна (табл. 2). Отчасти это связано с гораздо большим типовым разнообразием КСКМ лития в нем, а отчасти — с очевидной его незавершенностью: редко-

металльные пегматиты, в том числе и литиеносные, образуются в коллапсирующих коллизионных орогенах [3]. Такие орогены наиболее интенсивно формируются на кульминационной стадии объединения ранее разрозненных сиалических блоков в гигантский суперконтинент. Для будущего суперконтинента Амазия — эта самая активная фаза образования коллизионных поясов еще только в далекой перспективе [10].

Возможно, что в этой же категории геологических факторов следует искать объяснение и минимальному количеству пегматитовых КСКМ лития в родинийском цикле: степень дробления континентальной коры на всем его протяжении была минимальной [7], а потому и количество коллизионных орогенов, спаявших Родинию, было столь же аномально малым [9]. Соответственно и вероятность формирования пегматитовых КСКМ пропорционально ниже.

Наименьший вклад в ресурсный потенциал КСКМ лития в амазийском цикле внесли Li-F граниты (табл. 2). Хотя их проявления в мезозое-кайнозое многочисленны и географически распространены очень широко, но количественным лимитам для литиевого оруденения, установленным в данном исследовании, среди них отвечают только два объекта, образовавшихся в период от поздней юры до раннего мела (рис. 2): разрабатываемое крупнейшее в мире месторождение лепидолитовых руд Ичунь в Южно-Китайском поясе и только предварительно оцененное как литиевый объект, но потенциально крупнейшее месторождение амблигонитовых (с лепидолитом) руд Кестер в Верхоянском поясе (рис. 1).

Сравнение количественных характеристик КСКМ разных типов

Сравнение количественных параметров пегматитовых КСКМ лития между собой показывает, что абсолютное их большинство, независимо от возраста, попадает в относительно компактную «полосу» в интервале содержаний 0,9–1,5 % Li₂O (рис. 3). Отклонения от этого интервала в обе стороны единичны.

Отметим, что в области значений меньше 0,9 % Li₂O нет ни одного КСКМ кенорского цикла, при том, что все три положительных «отскока» в область выше 2,0 % Li₂O принадлежат пегматитовым КСКМ исключительно этого периода геологической истории: Бикита, Гринбушес, Танко. На общем фоне всех пегматитовых КСКМ эти три выделяет самая высокая степень дифференциации внутреннего строения мощных (70–300 м) и протяженных (1,5–3 км) тел с контрастным разделением в их объеме ряда минеральных фаз вплоть до образования простирающихся на сотни метров по латерали и многометровых по мощности зон, резко обогащенных теми или иными минералами (вплоть до мономинеральности), в том числе представляющими интерес для извлечения Li, Ta, Cs, Be. Среди таких зон есть и те, где резко доминируют или сподумен, или петалит, или лепидолит и т.п. Эти богатые определенным минералом зоны даже могут эксплуатироваться в таких объектах раздельными системами горных выработок.

В эпохах после кенорского цикла известны пегматитовые месторождения с тем же сложным комплексом

редких металлов, однако нет примеров объектов со столь же крупномасштабными зонами контрастного минерального состава, которые можно было бы отрабатывать в течение ряда лет селективно от прочих зон. Даже если контрастная зональность и проявлена в месторождениях более поздних эпох (например, в Коктогае), то количество и масштабы этих зон несопоставимо меньше. Поэтому логично предположить существование в архее специфических условий, создававших режим особого благоприятствования для формирования в некоторых местах пегматитов с такой контрастной дифференциацией вещества в крупных объемах. Вероятно, одно из таких особых условий — более высокая интенсивность теплового потока в земной коре, обусловленная повышенным уровнем архейских средне-мантийных температур [13]. На таком фоне в абиссальных фациальных зонах релаксирующих орогенов, где формируются редкометалльные пегматиты [3], очень вероятно возникновение длительно существующего ($n \cdot 10^6$ лет) высокотемпературного и одновременно низкоградиентного теплового поля. Такие условия очень благоприятны для длительной многокамерной дифференциации гранитного расплава и кристаллизации богатых редкими элементами пегматитовых тел при доминировании механизма гетерогенной нуклеации [2]. Данный режим предполагает предельно низкие скорости роста минералов и высокую вероятность формирования сменяющих друг друга мономинеральных или почти мономинеральных зон. Все это — отличные условия для пространственного разделения в пегматитах элементов и минералов, в том числе рудоносных. В пользу особенной благоприятности недр именно архейских орогенов продуктивному пегматитогенезу свидетельствует и тот очевидный факт, что в них выявлено почти столько же КСКМ лития этого типа, сколько в орогенах всех остальных циклов вместе взятых (табл. 2).

КСКМ в Li-F гранитах, которые известны в двух циклах — пангейском и амазийском, имеют минимальный среди всех типов разброс значений количественных характеристик (рис. 3). При этом единственный объект в низкофосфористых гранитах (Циновец), выделяющийся полным доминированием циннвальдита в рудах, в количественных параметрах рудоносности практически ничем не отличается от остальных КСКМ того же типа, связанных с высокофосфористыми гранитами. Все их точки располагаются на диаграмме рядом с точками тех пегматитовых объектов, что содержат наиболее бедные руды и средние по величине ресурсы.

КСКМ эпитептермального стратиформного типа разместились в области выше средних значений всей выборки по количеству ресурсов, но разделились по содержаниям лития в рудах: оба гекторитовых объекта попали на один уровень с Li-F гранитами, а единственный ядаритовый оказался выше большинства пегматитовых месторождений (рис. 3).

Наконец, КСКМ лития в сalaraх организуют свое поле точек, смещенное относительно ареала твердофазовых объектов в область меньших концентраций Li₂O (рис. 3). Тем не менее, относительно низкая себестои-

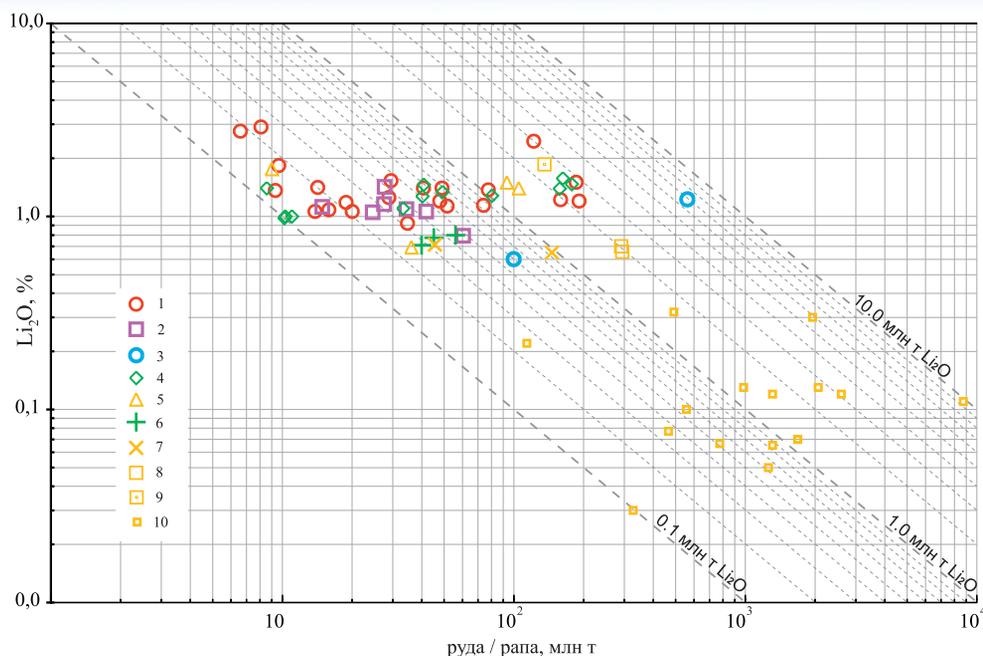


Рис. 3. Диаграмма «содержание-тоннаж» для КСКМ лития (использован логарифмический масштаб по двум осям). Условные обозначения для типа и возраста КСКМ: 1–5 — пегматиты разных циклов: 1 — кенорского, 2 — колумбийского, 3 — родинийского, 4 — пангейского, 5 — амазийского; 6–7 — литий-фтористые граниты двух циклов: 6 — пангейского, 7 — амазийского; 8–9 — эпиптермальные стратиформные залежи амазийского цикла: 8 — гекторитовые, 9 — ядаритовые; 10 — салары амазийского цикла

мость как уже используемых «медленных» технологий извлечения, основанных на естественной эвапоритизации рассолов, так и недавно разработанных и постепенно внедряемых более «быстрых» технологий прямого извлечения лития, основанных на ионно-обменных реакциях [8], скорее всего, позволят сохранить данному типу КСКМ ведущее значение в промышленном получении лития и его соединений в прогнозируемой перспективе. Впрочем, большая активность геологоразведочных и горнорудных компаний по оценке и вовлечению в эксплуатацию все новых и новых КСКМ с твердофазовыми рудами лития, а также постоянно растущее в мире потребление этого вида сырья, свидетельствует о том, что и такого рода объекты не потеряют, а может быть даже смогут увеличить свое экономическое значение. Поэтому дальнейшее развитие исследований металлогенических особенностей, в том числе и глобальных геосторических, начатых в данном исследовании, должно остаться актуальным для всех типов месторождений лития в обозримом будущем.

Заключение

Проведенный анализ глобальной выборки месторождений, в которых заключены практически все промышленно значимые или потенциально экономически интересные ресурсы лития, показал, что они формировались в разные геологические эпохи в интервале от позднего мезоархея до голоцена. Размещение этих ресурсов на шкале геологического времени имеет ярко выраженный дискретный импульсный характер.

Каждый из суперконтинентальных циклов, последовательно сменявших друг друга и определивших важнейшие черты геотектонического развития земной

коры на протяжении последних трех миллиардов лет, имеет свои особенности в проявлениях металлогении лития. В кенорский, колумбийский и родинийский циклы формировались только пегматитовые КСКМ лития. В пангейском цикле основные его ресурсы также связаны с пегматитовыми КСКМ, но небольшая часть локализована в Li-F редкометалльных гранитах. Пока незавершенный амазийский цикл наиболее разнообразен в типах КСКМ: пегматиты и Li-F граниты в совокупности обеспечили десятую часть ресурсов, в полтора раза больше — эпиптермальные стратиформные залежи, а три четверти — салары.

Среди КСКМ твердофазовых руд лития и количественно, и географически наиболее распространены

объекты пегматитового типа, который является единственным сквозным в геологической истории. Максимальное количество КСКМ данного типа, суммарных ресурсов в них и наиболее высокие средние содержания лития установлены для кенорского цикла, что позволило предположить существование в архее особо благоприятных условий для возникновения продуктивных на литий пегматитов.

Играющие особо значимую роль в ресурсной базе и промышленном получении лития месторождения в саларах и потенциально очень значимые стратиформные месторождения эпиптермального типа являются феноменом только амазийского цикла. Хотя теоретически возможно их формирование, начиная с палеопротерозоя после завершения ВОС, но даже косвенных признаков их существования за пределами миоцена пока не выявлено.

Территория Российской Федерации состоит из тектонических блоков, сформировавшихся в разные периоды геологической истории Земли от палеоархея до кайнозоя. Описанные выше особенности проявлений металлогении лития обязательно нужно учитывать при осуществлении прогнозных построений в зависимости от тектонического развития анализируемого региона и отдельных его частей в разные суперконтинентальные циклы.

Исследования выполнены при финансовой поддержке проектов №0140-2018-0003 государственных работ (создание базы данных и ГИС) и №0140-2018-0004 по программе № 48 ФНИ президиума РАН (анализ и синтез информации) в ФГБУН «Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского» РАН (ГГМ РАН).

ЛИТЕРАТУРА

1. Линде, Т.П. Литий России: состояние, перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы / Т.П. Линде, О.Д. Ставров, Н.А. Юшко и др. // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. — 2000. — № 6. — 116 с.
2. Ткачев, А.В. О происхождении зональности пегматитов / А.В. Ткачев // Отечественная геология. — 1994. — № 7. — С. 52–58.
3. Ткачев, А.В. Металлогеническая эволюция гранитного пегматито-генеза в истории Земли: основные тенденции и вероятные причины / А.В. Ткачев // Бюллетень МОИП, сер. геол. — 2011. — Т. 86. — № 1. — С. 41–57.
4. Ткачев, А.В. Крупнейшие мировые миоцен четвертичные бор-литиевые провинции. Статья 3. Геодинамический сценарий формирования / А.В. Ткачев, Т.В. Романюк // Бюлл. МОИП, отд. геологич. — 2010. — Т. 85. — Вып. 1. — С. 27–47.
5. Ткачев, А.В. Глобальные тенденции в эволюции металлогенических процессов как отражение суперконтинентальной цикличности / А.В. Ткачев, Д.В. Рундквист // Геология рудных месторождений. — 2016. — Т. 58. — № 4. — С. 295–318.
6. Ткачев, А.В. Веб-ГИС «Крупнейшие месторождения мира» / А.В. Ткачев, С.В. Булов, Д.В. Рундквист и др. // Геоинформатика. — 2015. — № 1. — С. 47–59.
7. Bradley, D.C. Passive margins through earth history / D.C. Bradley // Earth-Science Reviews. — 2008. — V. 91. — P. 1–26.
8. Christmann, P. Chapter 1 — Global lithium resources and sustainability issues / P. Christmann, E. Gloaguen, J.-F. Labbé et al. // Lithium Process Chemistry: Resources, Extraction, Batteries and Recycling. A. Chagnes & J. Światowska (eds.). Elsevier, Amsterdam, 2015. — P. 1–40.
9. Condie, K.C. Preservation and recycling of crust during accretionary and collisional phases of Proterozoic orogens: a bumpy road from Nuna to Rodinia / K.C. Condie // Geosciences. — 2013. — V. 3. — P. 240–261.
10. Duarte, J.C. The future of Earth's oceans: consequences of subduction initiation in the Atlantic and implications for supercontinent formation / J.C. Duarte, W.P. Schellart, F.M. Rosas // Geological Magazine. — 2018. — V. 155 (1). — P. 45–58.
11. Gumsley, A.P. Timing and tempo of the Great Oxidation Event / A.P. Gumsley, K.R. Chamberlain, W. Bleeker et al. // PNAS, 2017. — V. 114 (8). — P. 1811–1816.
12. Kesler, S.E. Global lithium resources: relative importance of pegmatite, brine and other deposits / S.E. Kesler, P.W. Gruber, P.A. Medina, G.A. Keoleian, M.P. Everson, T.J. Wallington // Ore Geology Reviews. — 2012. — V. 48. — P. 55–69.
13. Labrosse, S. Thermal evolution of the Earth: secular changes and fluctuations of plate characteristics / S. Labrosse, C. Jaupart // Earth Planet. Sci. Letters. — 2007. — V. 260. — P. 465–481.
14. McCauley A., Bradley D.C. The global age distribution of granitic pegmatites / A. McCauley, D.C. Bradley // Canadian Mineralogist. — 2014. — V. 52. — P. 183–190.

© Ткачев А.В., Рундквист Д.В., Вишневская Н.А., 2018

Ткачев Андрей Владимирович // a.tkachev@sgm.ru; avtkachev@mail.ru
Рундквист Дмитрий Васильевич // dvr@sgm.ru
Вишневская Наталья Анатольевна // 200962@mail.ru

УДК 550.84

Григоров С.А. (ФГБУ «ИМГРЭ»)

СТРУКТУРЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ КАК ИНСТРУМЕНТ ЛОКАЛИЗАЦИИ И РАНЖИРОВАНИЯ РУДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА СТАДИИ СРЕДНЕМАСШТАБНЫХ ПОИСКОВ

Эффективность поисков рудных месторождений может быть кардинально увеличена путем структурно-геохимического анализа исходных данных. Структура автономного геохимического поля ореолообразующей и рудообразующей систем является самодостаточным инструментом идентификации и оценки рудных объектов на стадии среднemasштабных поисков без привлечения

дорогостоящих геологических и геофизических исследований. Ключевые слова: поиски рудных месторождений, структура геохимического поля, концентрическая зональность, фрактальная структура, локализация, ранжирование, рудные узлы, рудные поля.

Grigorov S.A. (IMGRE)

THE STRUCTURES OF GEOCHEMICAL FIELDS, AS A TOOL FOR LOCALIZATION AND RANKING OF ORE OBJECTS AT THE STAGE OF MEDIUM-SCALE SEARCHES

The efficiency of prospecting for ore deposits can be cardinally increased by a structural-geochemical analysis of the initial data. The structure of the autonomous geochemical field of the halo-forming and ore-forming system is a self-sufficient tool for identifying and evaluating ore objects at the stage of medium-scale searches, without involving costly geological and geophysical studies. Keywords: searches for ore deposits, geochemical field structure, concentric zoning, fractal structure, localization, ranking, ore sites, ore fields.

Среди практических задач поисковой геологии на первом месте стоит обоснование локализации рудных узлов и рудных полей как основы для оценки состояния ресурсов полезных ископаемых, государственного учета и управления минерально-сырьевой базой страны.

Эмпирический опыт системного исследования структур геохимических полей и хорошо изученных рудных объектов позволяет утверждать, что формирование обширного класса рудных месторождений является продуктом необратимого нелинейного, прерывисто-непрерывного процесса эволюции геохимического поля рудообразующей системы. Концептуальным обоснованием является фундаментальная теория самоорганизации в процессе рассеяния (диссипации) энергии и вещества, применимая к любым системам в живой и неживой природе*. Законы самоорганизации из всего класса естественных наук не приемлет только поисковая геология и металлогения, традиционно основанные на исторических принципах и линейных моделях. Несоответствие законов природы и традиционных поисковых моделей является основной причиной низкой эффективности поисков вообще и решения прикладных задач геологии, в частности. На реальных примерах установлено, что рудные объекты в иерархическом ряду от рудных узлов до рудных тел адекватно отражаются в упорядоченных структурах геохимических полей, которые и являются аномалиями. Критериями локализации и ранжирования таксонов иерархической системы рудообразования служат четыре основных вида геохимической зональности в контексте фрактальной структуры: концентрическая зональность центробежного и центростремительного типа, синхронная зональность и латеральная зональность. **Фрактальная структура** представляет собой системы таксонов в

* Пригожин И.Р., Стенгерс И. Время, хаос, квант. — М: Прогресс, 1994. — 272 с.