



ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ТЕНДЕНЦИИ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ЛИТИЯ В ЗЕМНОЙ КОРЕ И НА ЕЕ ДНЕВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А. Г. Владимиров^{1,2,3}, В. Е. Загорский⁴, С. Л. Шварцев^{5,6}, В. П. Исупов⁷, С. З. Смирнов^{1,2}, С. В. Алексеев⁸, Л. П. Алексеева⁸, Н. И. Волкова^{1,2}, И. Ф. Гертнер², В. М. Макагон⁴, Л. Г. Кузнецова⁴, И. Ю. Анникова^{1,2}, М. Н. Колпакова⁶, Е. И. Михеев^{1,3}, П. Д. Котлер^{1,3}, О. А. Гаврюшкина^{1,3}

Рассматривается поведение одного из технологически важнейших редких элементов – лития в природных системах: гранитно-пегматитовых, подземных рассолах и сalaraх. Главными промышленными источниками лития являются сподуменовые пегматиты и рапа соляных озер. Настоящая статья представляет собой краткий обзор новейших материалов по Сибири и другим регионам мира, включая авторские данные, в которых охарактеризована геолого-структурная позиция крупных полей сподумен-пегматитовых месторождений, литиеносных подземных рассолов и соляных озер (саларов), которые имеют промышленные концентрации Li_2O и сопутствующих редких элементов (в сподуменовых пегматитах – Ta, Nb, Rb, Cs, в гидроминеральных источниках – B, Br, U, As и др.). Главное внимание уделено анализу коррелятивных связей геологических комплексов (формаций) и геодинамических обстановок их формирования. Сделан вывод о том, что динамика формирования гигантских месторождений лития, вероятнее всего, обусловлена двумя факторами: 1) концентрированием Li_2O в редкометалльных гранитно-пегматитовых расплавах и метасоматитах на глубинных уровнях земной коры; 2) привнесом Li_2O из мантии в составе контрастных субщелочных рудно-магматических систем (через гидротермы и травертины на дневную поверхность).

Ключевые слова: литий, геохимия магматических пород, месторождения сподуменовых пегматитов, подземные рассолы, рапа соляных озер, геодинамика, гидрогеохимия.

GEOCHEMICAL TENDENCIES OF LITHIUM CONCENTRATION IN THE EARTH'S CRUST AND ABOVE ITS GROUND SURFACE

A. G. Vladimirov, V. E. Zagorskiy, S. L. Shvartsev, V. P. Isupov, S. Z. Smirnov, S. V. Alekseev, L. P. Alekseeva, N. I. Volkova, I. F. Gertner, V. M. Makagon, L. G. Kyznetsova, I. U. Annikova, M. N. Kolpakova, E. I. Mikheev, P. D. Kotler, O. A. Gavryushkina

The article examines the behavior of one of the technologically most important trace elements (lithium) in natural systems: granitic pegmatite, subsurface brines and salars. Major lithium sources are spodumene pegmatites and natural brine of salt lakes. This article is a brief overview of the latest data on Siberia and other world regions, including authors data. They are characterized by geological and structural position of major fields of spodumene-pegmatite deposits, underground lithium brines, and salt lakes (salar) showing commercial concentrations of lithium and are related to rare elements (in spodumene pegmatites – Ta, Nb, Rb, Cs, in hydromineral sources – B, Br, U, As, etc.). The main attention is paid to the correlative links analysis of geological complexes (formations) and geodynamic settings of their formation. It is concluded that the formation dynamics of lithium giant deposits is likely caused by two factors: 1) concentration of Li_2O in rare-metal granitic pegmatite melts and metasomatites in deep crustal levels; 2) influx of mantle Li_2O consisting of contrast subalkalic ore-magmatic systems (through hydrothermas and travertines to the ground surface).

Keywords: lithium, geochemistry of magmatic rocks, deposits of spodumene pegmatites, underground brines, natural brine of salt lakes, geodynamics, hydrogeochemistry.

Литий – один из технологически важнейших редких элементов. Главными промышленными источниками лития являются сподуменовые пегматиты и рапа соляных озер. В пегматитах он приобретает статус породообразующего элемента, конкурируя с натрием и калием. Содержания Li_2O в сподуменовых пегматитах составляют первые проценты, достигая в отдельных участках тел 3–4 мас. %. Столь высокая степень концентрирования Li_2O требует особых геологических условий для формирования пегматитов, вероятнее

всего, с участием мантийных компонентов. Промышленные концентрации Li_2O в подземных рассолах и рапе соляных озер 25–300 мг/л и выше, достигая в сalaraх 1000–7000 мг/л, а запасы Li_2O в некоторых сalaraх Южной Америки достигают 5–6 млн т, что также ставит вопрос о мантийном источнике этого элемента.

Крупные поля сподуменовых пегматитов

В пределах Центрально-Азиатского складчатого пояса во временном интервале от докембрия до позднего мезозоя установлена тесная связь крупных полей сподуменовых пегматитов с обстановками растяжения континентальной литосферы, а их четкая корреляция со статистическими пиками плюмовой активности позволяет

¹ИГМ СО РАН (Новосибирск); ²ТГУ (Томск);

³НГУ (Новосибирск); ⁴ИГХ СО РАН (Иркутск);

⁵ТФ ИНГГ СО РАН (Томск); ⁶НИ ТПУ (Томск);

⁷ИХТТМ СО РАН (Новосибирск); ⁸ИЗК СО РАН (Иркутск)

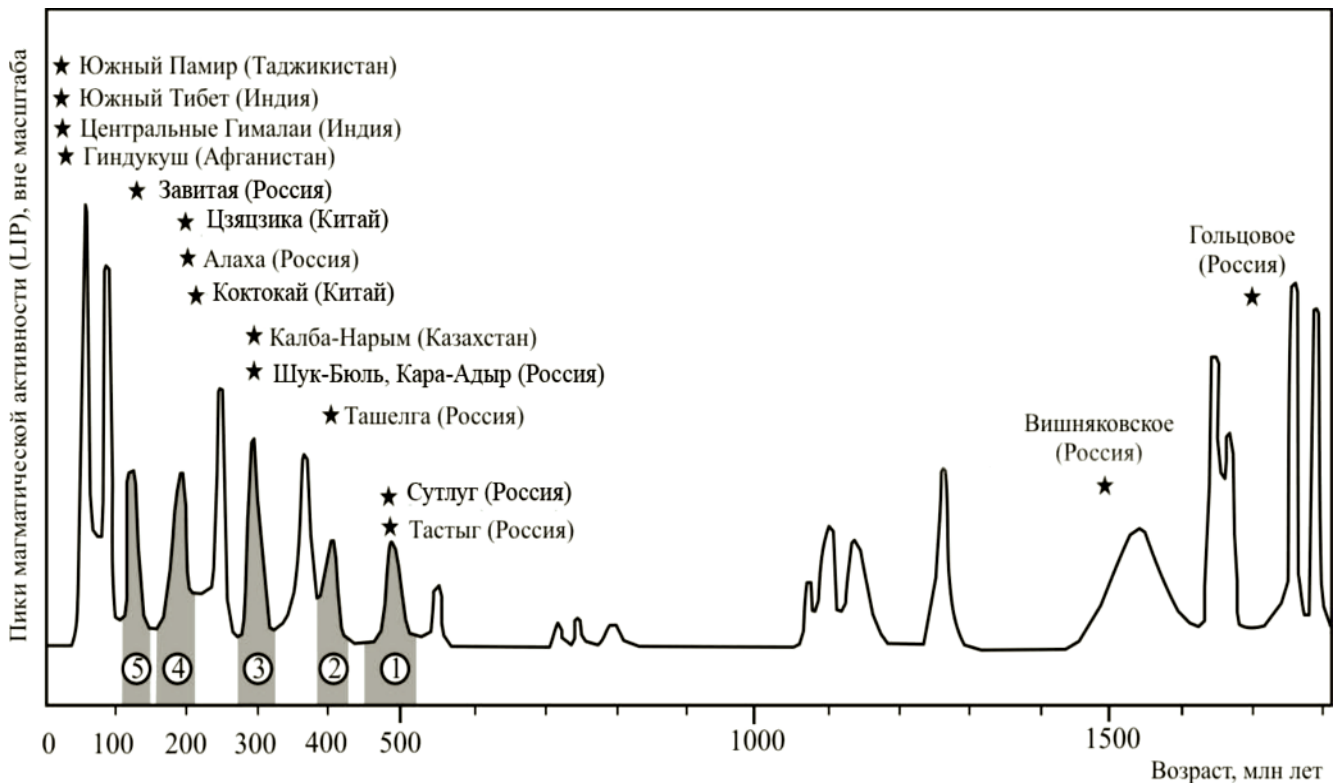


Рис. 1. Главные возрастные рубежи формирования крупных полей сподуменовых пегматитов Азии и их корреляция с плюмовой активностью в литосфере

Фоновая (мировая) шкала крупных изверженных провинций (LIP) на представленной гистограмме отвечает [15] с дополнениями [3, 4, 11, 13, 14]. Крупные изверженные провинции (LIP) Южной Сибири и Восточного Казахстана, отвечающие фанерозойскому возрасту: 1 – Алтае-Саянская, 2 – Минусинская, 3 – Калба-Нарымская, 4 – Коктогайская, 5 – Восточно-Забайкальская

предполагать мантийное происхождение лития (рис. 1).

Для образования пегматитов важным благоприятным фактором является наличие мощной зрелой коры, которая трассируется глубоко проникающими (вплоть до верхней мантии) длительно действующими тектоническими структурами, облегчающими воздействие глубинных источников энергии и вещества на коровые очаги гранито- и пегматитообразования [3–5]. В случаях значительного временного разрыва (от первых десятков до сотен миллионов лет) между сподуменовыми пегматитами и гранитами, с которыми они пространственно ассоциируют, целесообразно выделять *самостоятельный пегматитовый этап* в истории магматизма пегматитоносных регионов [1, 3]. Сподуменовые пегматиты могут быть следствием воздействия на земную кору термохимических плюмов, инициирующих формирование крупных изверженных и литиевых металлогенических провинций [5, 10, 11, 15, 16].

Литиеносные подземные рассолы Сибирской платформы

Литиеносные подземные рассолы приурочены к осадочным толщам позднекембрийского – кембрийского возрастов [6]. Распространение рассолов четко коррелирует с присутствием в разрезах каменной соли: в Иркутской области по

отношению к пластам каменной соли выделяются подсолевая (терригенная), соленосная (галогеменная) и надсолевая (карбонатная) гидрогеологические формации. Первая ($V-C_1$), мощностью от 500–1000 до 2000–2500 м, залегает на фундаменте Сибирской платформы и сложена отложениями ушаковской и мотской свит нижнего кембрия и рифея. Водовмещающими для нее являются песчаники, доломиты и доломито-ангидриты. В этой формации отчетливо выражена гидрогеохимическая инверсия, свойственная Ангаро-Ленскому артезианскому бассейну: в подсолевых горизонтах минерализация рассолов меньше, чем в рассолах перекрывающей соленосной толщи. Ее значения изменяются от 360 до 420 г/л. В верхней части верхнемотской подсвиты вскрыты предельно насыщенные рассолы с минерализацией 518 г/л (Кийская площадь). Состав рассолов в подсолевой гидрогеологической формации преимущественно хлоридный магниевый-кальциевый и реже кальциево-натриевый.

Соленосная (галогеменная) гидрогеологическая формация (E_1) охватывает отложения усольской, бельской, булайской и ангарской свит раннего кембрия. На долю пластов каменной соли приходится более половины их суммарной мощности. Глубина залегания соленосной формации 600–2500 м. Водовмещающие отложения имеют значительную мощность (1500–2000 м) и представлены трещино-



ватыми и кавернозными доломитами, известняками. Характерно развитие крепких, весьма крепких и предельно насыщенных рассолов. По химическому составу они относятся к хлоридным магниево-кальциевым, реже кальциевым со средней минерализацией 270–500 г/л, максимальной 631 г/л.

Литиеносные салары и соленые озера

Условия формирования саларов Южной Америки, Тибета и соленых озер Монголии, анализ которых приведен в [7–9], позволяют сделать следующий вывод. Содержания Li_2O в водах конечных водоемов стока определяются литиеносностью питающих наземных и подземных вод, степенью минерализации рассолов, тектоновулканической активностью районов и климатическим режимом, который мог приводить к неоднократной садке легкорастворимых солей и, соответственно, обогащению литием остаточной рапы. Примером, иллюстрирующим эти выводы, является классический геологический разрез через салар де Атакама (Чили) (рис. 2). Впадины тектонического происхождения, которые занимает салар, а также сопряженные с ним бессточные котловины – естественные геоморфологические и структурные ловушки, в которых идет аккумуляция легкоподвижных и легкорастворимых компонентов, включая Li . В этом смысле из изученных авторами объектов эталонотипным является высокоминерализованное оз. Давсан-Нуур (северо-западная Монголия), для которого доказана тесная пространственная

связь с рифтогенной вулканической структурой кайнозойского возраста [2, 5, 12].

Заключение

Представленные геохимические и гидрогеохимические материалы позволяют сделать следующие выводы.

1. Литиевые металлогенические провинции на глубинных уровнях земной коры представляют собой автономные очаговые ареалы, для которых предполагается связь с мантийно-коровым магматизмом и сдвигово-раздвиговыми деформациями литосферы, дренирующими весь разрез земной коры вплоть до верхней мантии. На дневной поверхности литиевые провинции представлены саларами и высокоминерализованными озерами, образующимися за счет кислотного выщелачивания вулканических пород шошонит-латит-К-риолитовых серий, имеющих мантийно-коровое происхождение.

2. Динамика формирования гигантских месторождений лития, вероятнее всего, обусловлена двумя факторами: а) концентрированием Li_2O в редкометалльных гранитно-пегматитовых расплавах и метасоматитах на глубинных уровнях земной коры; б) привнесом Li_2O из мантии в составе контрастных субщелочных рудно-магматических систем (через гидротермы и травертины на дневную поверхность).

Работа выполнена при финансовой поддержке междисциплинарных и партнерских проектов № 77, 110, 123 Президиума СО РАН, Программы по

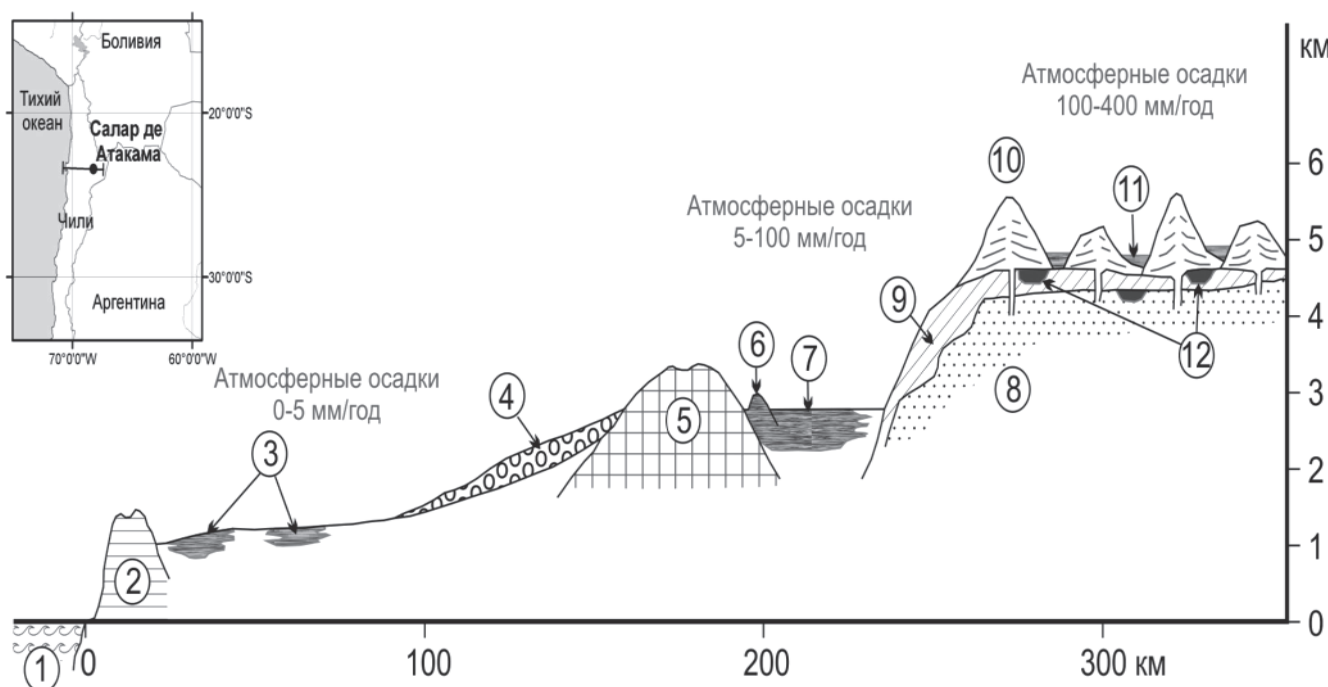


Рис. 2. Геологический разрез «Тихий океан – Высокие Анды», иллюстрирующий динамику формирования литиеносных высокоминерализованных вод салара де Атакама [9]

Цифрами в кружках обозначены географические и геологические единицы: 1 – акватория Тихого океана; 2 – Береговой хребет, нерасчлененный; 3–4 – пустыня Атакама; 3 – конусы выноса предгорьев Кордильер; 5 – Предкордильеры (хребет Домейко); 6–7 – предандские депрессии: 6 – Кордильера-де-ла-Саль, 7 – салар де Атакама; 8–10 – Высокие Анды: 8 – кристаллическое основание, 9 – ингимбриты кислого состава, 10 – стратовулканы; 11 – современные салары; 12 – предполагаемые захороненные салары в Высоких Андах



вышения конкурентоспособности Томского государственного университета, а также проектов РФФИ № 12-05-31470, 13-05-01075, 14-05-00747.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Загорский, В. Е.** Проблемы петрологии пегматитовых месторождений редких металлов [Текст] / В. Е. Загорский, В. М. Макагон // *Благородные и редкие металлы Сибири и Дальнего Востока: рудообразующие системы месторождений комплексных и нетрадиционных типов руд: матер. конф. Т. 1.* – Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2005. – С. 56–59.

2. **Колпакова, М. Н.** Геохимия соленых озер Западной Монголии: Автореф. дис. ... к.г.-м. н. [Текст] / М. Н. Колпакова. – Томск, 2014. – 21 с.

3. **Крупные** поля сподуменовых пегматитов в обстановках рифтогенеза и постколлизийных сдвигово-раздвиговых деформаций континентальной литосферы [Текст] / В. Е. Загорский, А. Г. Владимиров, В. М. Макагон [и др.] // *Геология и геофизика.* – 2014. – № 2. – С. 237–251.

4. **Литиевые** месторождения сподуменовых пегматитов Сибири [Текст] / А. Г. Владимиров, Н. З. Ляхов, В. Е. Загорский [и др.] // *Химия в интересах устойчивого развития.* – 2012. – Т. 20, № 1. – С. 3–20.

5. **Литиевые** металлогенические провинции и их взаимосвязь с плюмовой активностью в литосфере [Текст] / А. Г. Владимиров, В. Е. Загорский, И. Н. Волкова [и др.] // *Геодинамика и минерагения Северо-Восточной Азии: матер. IV Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 40-летию Геологического института СО РАН.* – Улан-Удэ: Экос, 2013. – С. 68–72.

6. **Литиевые** подземные воды Иркутской области и Западной Якутии [Текст] / С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева, А. Г. Вахромеев [и др.] // *Химия в интересах устойчивого развития.* – 2012. – Т. 20, № 1. – С. 27–33.

7. **Литиевые** соляные озера Южной Америки и Центральной Азии [Текст] / Н. И. Волкова, А. Г. Владимиров, В. П. Исупов, Е. Н. Мороз // *Химия в интересах устойчивого развития.* – 2012. – Т. 20, № 1. – С. 21–27.

8. **Литий** и уран в бессточных озерах Западной Монголии [Текст] / С. Л. Шварцев, В. П. Исупов,

А. Г. Владимиров [и др.] // *Химия в интересах устойчивого развития.* – 2012. – Т. 20, № 1. – С. 43–49.

9. **Романюк, Т. В.** Геодинамический сценарий формирования крупнейших мировых неоген-четвертичных бор-литиевых провинций [Текст] / Т. В. Романюк, А. В. Ткачев. – М.: Светоч Плюс, 2010. – 304 с.

10. **Параметры** горячих точек и термохимических плюмов в процессе подъема и излияния [Текст] / Н. Л. Добрецов, А. А. Кирдяшкин, А. Г. Кирдяшкин [и др.] // *Петрология.* – 2006. – Т. 14, № 5. – С. 508–523.

11. **Термохронологическая** модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений [Текст] / Н. Л. Добрецов, А. С. Борисенко, А. Э. Изох, С. М. Жмодик // *Геология и геофизика.* – 2010. – Т. 51, № 9. – С. 159–1187.

12. **Химический** состав и гидроминеральные ресурсы соленых озер Северо-Западной Монголии [Текст] / В. П. Исупов, А. Г. Владимиров, С. Л. Шварцев [и др.] // *Химия в интересах устойчивого развития.* – 2011. – Т. 19, № 2 – С. 141–150.

13. **Ярмолук, В. В.** Батолиты и геодинамика батолитообразования в Центрально-Азиатском складчатом поясе [Текст] / В. В. Ярмолук, В. И. Коваленко // *Геология и геофизика.* – 2003. – Т. 44, № 12. – С. 1260–1274.

14. **Ярмолук, В. А.** Позднепалеозойский и раннемезозойский редкометалльный магматизм Центральной Азии: этапы, области и обстановки формирования [Текст] / В. А. Ярмолук, М. И. Кузьмин // *Геология рудных месторождений.* – 2012. – Т. 54, № 5. – С. 375–399.

15. **Abbott, D. H.** The intensity, occurrence, and duration of superplume events and eras over geological time [Text] / D. H. Abbott, A. E. Isley // *Journal of Geodynamics.* – 2002. – N 34. – P. 265–307.

16. **Geodynamic** settings of lithium deposits formation [Text] / A. G. Vladimirov, V. E. Zagorsky, N. I. Volkova [et al.] // *International symposium Large Igneous provinces of Asia Mantle plumes and metallogeny.* – Hanoi (Vietnam), 2013. – P. 33–36.

© А. Г. Владимиров, В. Е. Загорский, С. Л. Шварцев, В. П. Исупов, С. З. Смирнов, С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева, Н. И. Волкова, И. Ф. Гертнер, В. М. Макагон, Л. Г. Кузнецова, И. Ю. Анникова, М. Н. Колпакова, Е. И. Михеев, П. Д. Котлер, О. А. Гаврюшкина, 2014