

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

А.Г. Владимиров^{1,2,3}, В.Е. Загорский⁴, С.Л. Шварцев⁵, В.П. Исупов⁶, С.З. Смирнов^{1,2}, С.В. Алексеев⁷, Л.П. Алексеева⁷, Н.И. Волкова^{1,2}, И.Ф. Гертнер², В.М. Макагон⁴, Л.Г. Кузнецова⁴, И.Ю. Анникова^{1,2}, М.Н. Колпакова⁵, Е.И. Михеев^{1,2}, П.Д. Котлер^{1,2},
О.А. Гаврюшкина^{1,3}

1– Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т. Коптюга, 3, Россия;

2– Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2, Россия

3– Томский государственный университет 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36,

4– ИГХ СО РАН (Иркутск) 664033, г. Иркутск, а/я 304, ул. Фаворского, 1А

5– ИНГТ СО РАН (Томский филиал), 634021, Томск, пр. Академический, 4

6– ИХТТМ СО РАН 630128, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18.

7– ИЗК СО РАН (Иркутск) 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128

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 соленых озер (саларов), которые имеют промышленные концентрации Li_2O и сопутствующих редких элементов (в сподуменовых пегматитах – Ta, Nb, Rb, Cs, в гидроминеральных источниках – В, 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).

литий, геохимия магматических пород, месторождения сподуменовых пегматитов, подземные рассолы, рапа соляных озер, геодинамика, гидрогеохимия

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

A.G. Vladimirov, V.Ye. Zagorsky, S.L.Shvarcev, V.P. Isupov, S.Z. Smirnov, S.V. Alekseev,
L.P. Alekseeva, N.I. Volkova, I.F. Gertner, V.M. Makagon, L.G. Kyznecova, I.U. Annikova,
M.N. Kolpakova, E.I. Mikheev, P.D. Kotler, O.A. Gavrushkina

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 sources of lithium are spodumene pegmatites and brine of salt lakes. This article is a brief overview of the latest materials in Siberia and other regions of the world, including copyright data, which is characterized by geological and structural position of the major fields of spodumene-pegmatite deposits underground lithium brines, and salt

lakes (salars) which have industrial concentration of lithium and related rare elements (in spodumene pegmatites – Ta, Nb, Rb, Cs, in hydromineral sources – B, Br, U, As, etc.). The main attention is paid to the analysis of correlative links geological complexes (formations) and geodynamic conditions of their formation. Concluded that the dynamics of the formation of huge deposits of lithium is likely due to two factors: 1) the concentration of lithium in the rare-metal granitic pegmatite melts and metasomatites on deep crustal levels; 2) the influx of mantle lithium comprising contrast subalkalic ore-magmatic systems (through fluids and travertines to the the earth's surface).

lithium, geochemistry of igneous rocks, deposits of spodumene pegmatites, underground brines, 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 мантийной компоненты. Промышленные концентрации Li_2O в подземных рассолах и рапе соляных озер 25–300 мг/л и выше, достигая в саларах 1000–7000 мг/л, а запасы Li_2O в некоторых саларах 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 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 [2, 3, 7].

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 [7, 8]. Сподуменовые пегматиты могут быть следствием воздействия на земную кору термохимических плюмов, инициирующих формирование крупных изверженных и литиевых металлогенических провинций [3, 5, 6, 15, 16].

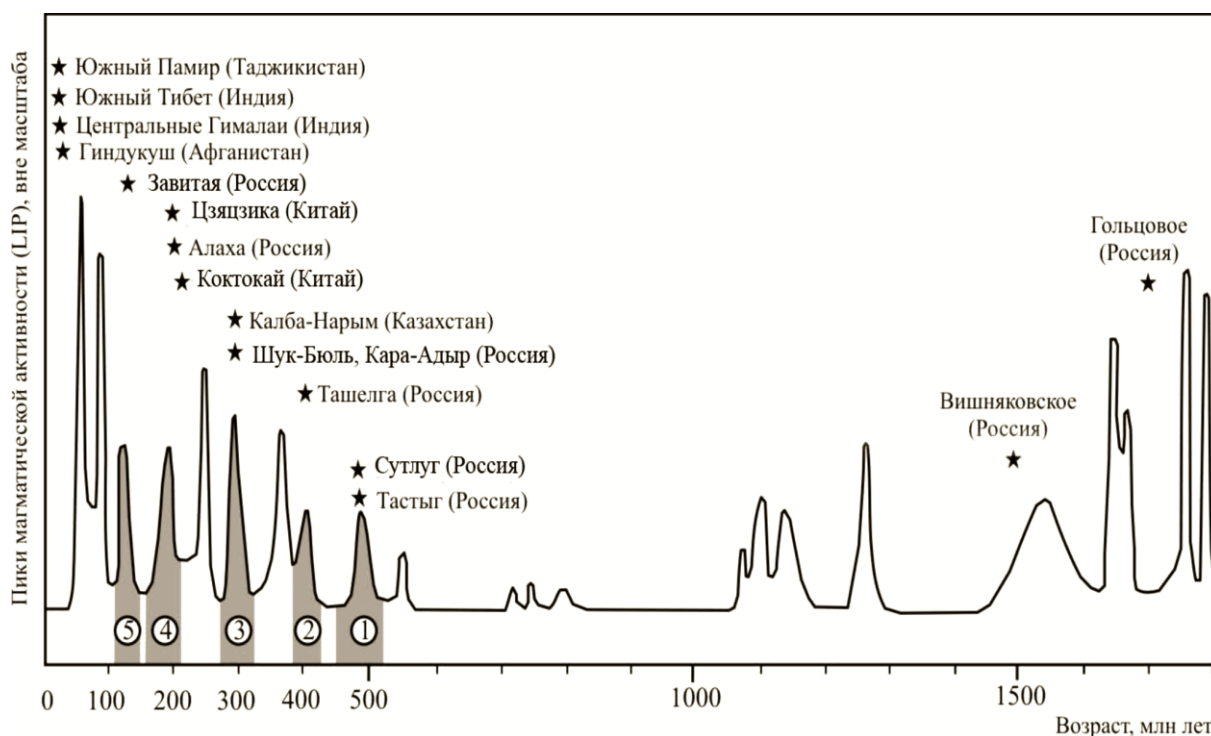


Рис. 1. Главные возрастные рубежи формирования крупных полей сподуменовых пегматитов Азии и их корреляция с плюмовой активностью в литосфере.

Фоновая (мировая) шкала крупных изверженных провинций (LIP) на представленной гистограмме отвечает [15] с дополнениями [2, 6, 7, 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

ЛИТИЕНОСНЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ РАССОЛЫ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Литиеносные подземные рассолы приурочены к осадочным толщам позднедокембрийского – кембрийского возрастов [1]. Распространение рассолов четко коррелируется с присутствием в разрезах каменной соли: в Иркутской области по отношению к пластам каменной соли выделяются подсолевая (терригенная), соленосная (галогеенная) 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 подсветы вскрыты предельно насыщенные рассолы с минерализацией 518 г/л (Кийская площадь). Состав рассолов в подсолевой гидрогеологической формации преимущественно хлоридный магниевый-кальциевый и реже кальциевый-натриевый.

Соленосная (галогеенная) гидрогеологическая формация (C_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 трещиноватыми 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 СОЛЕННЫЕ ОЗЕРА

Условия формирования саларов Южной Америки, Тибета и соленых озер Монголии, анализ которых приведен в [4, 11, 12], 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).

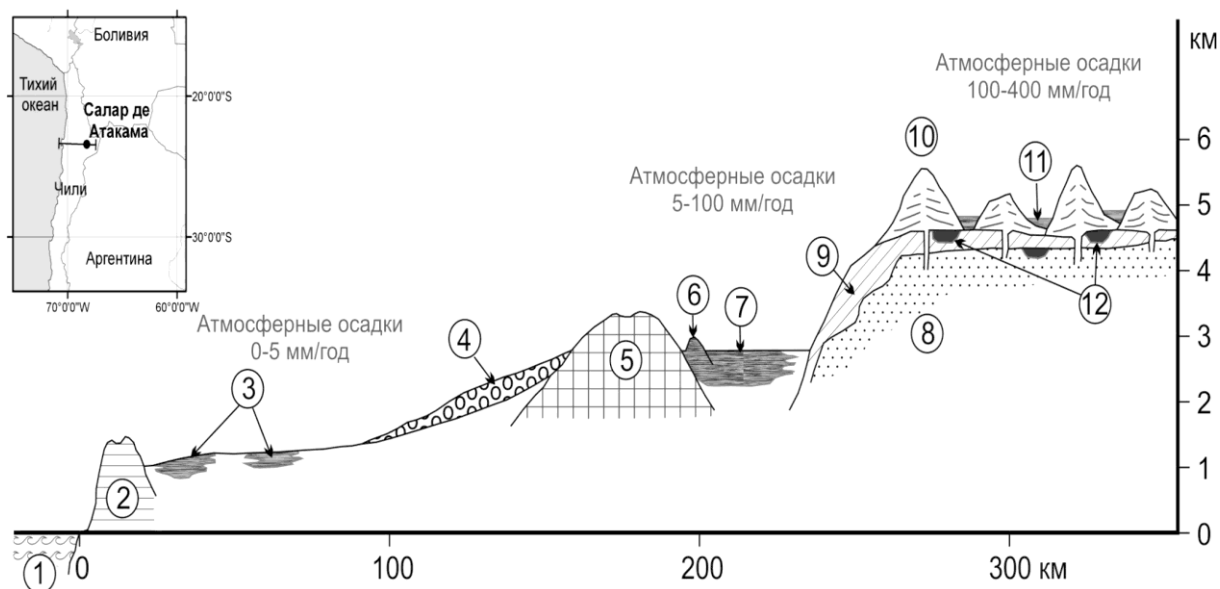


Рис. 2. Геологический разрез «Тихий океан – Высокие Анды», иллюстрирующий динамику формирования литиеносных высокоминерализованных вод салара де Атакама [11]

Цифрами в кружках обозначены географические и геологические единицы: 1 – акватория Тихого океана; 2 – Береговой хребет, нерасчлененный; 3–4 – пустыня Атакама: 3 – салары, 4 – 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

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 [3, 9, 10].

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

ЛИТЕРАТУРА

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

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

3. Владимиров А.Г., Загорский В.Е., Волкова И.Н. и др. Литиевые металлогенические провинции и их взаимосвязь с плюмовой активностью в литосфере // Геодинамика и минерагения Северо-Восточной Азии: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 40-летию Геологического института СО РАН (Улан-Удэ, 26–31 августа 2013 г.). Улан-Удэ: Экос, 2013. С. 68–72.

4. Волкова И.И., Владимирова А.Г., Исупов В.П. и др. Литиевые соляные озера Южной Америки и Центральной Азии // Химия в интересах устойчивого развития, 2012. Т. 20. № 1. С. 21–27.

5. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г. и др. Параметры горячих точек и термохимических плюмов в процессе подъема и излияния // Петрология, 2006. Т. 14. № 5. С. 508–523.
6. Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э. и др. Термохронологическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений // Геология и геофизика, 2010. Т. 51. № 9. С. 1159–1187.
7. Загорский В.Е., Владимиров А.Г., Макагон В.М. и др. Крупные поля сподуменовых пегматитов в обстановках рифтогенеза и постколлизийных сдвигово-раздвиговых деформаций континентальной литосферы // Геология и геофизика, 2014. № 2. С. 237–251.
8. Загорский В.Е., Макагон В.М. Проблемы петрологии пегматитовых месторождений редких металлов // Благородные и редкие металлы Сибири и Дальнего Востока: рудообразующие системы месторождений комплексных и нетрадиционных типов руд. Материалы конференции. Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2005. Т. 1. С. 56–59.
9. Исупов В.П., Владимиров А.Г., Шварцев С.Л. и др. Химический состав и гидроминеральные ресурсы соленых озер Северо-Западной Монголии // Химия в интересах устойчивого развития, 2011. Т. 19, № 2. С. 141–150.
10. Колпакова М.Н. Геохимия солёных озёр Западной Монголии // Автореферат канд. дисс. Томск, 2014. 21 с.
11. Романюк Т.В., Ткачев А.В. Геодинамический сценарий формирования крупнейших мировых неоген-четвертичных бор-литиеносных провинций. М.: Светоч Плюс, 2010. 304 с.
12. Шварцев С.Л., Исупов В.П., Владимиров А.Г. и др. Литий и уран в бессточных озёрах Западной Монголии // Химия в интересах устойчивого развития, 2012. Т. 20. № 1. С. 43–49.
13. Ярмолук В.В., Коваленко В.И. Батолиты и геодинамика батолитообразования в Центрально-Азиатском складчатом поясе // Геология и геофизика, 2003. Т. 44. № 12. С. 1260–1274.
14. Ярмолук В.А., Кузьмин М.И. Позднепалеозойский и раннемезозойский редкометалльный магматизм Центральной Азии: этапы, области и обстановки формирования // Геология рудных месторождений, 2012. Т. 54. № 5. С. 375–399.
15. Abbott D.H., Isley A.E. The intensity, occurrence, and duration of superplume events and eras over geological time // Journal of Geodynamics 34 (2002). P. 265-307.
16. Vladimirov A.G., Zagorsky V.E., Volkova N.I. et al. Geodynamic settings of lithium deposits formation // International symposium Lakge Igneous provinces of Asia Mantle plumes and metallogeny. Hanoi, Vietnam, November 8-9, 2013. P. 33–36.