

РАЗДЕЛ VI. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ И УГЛЕВОДОРОДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЛОЖНОГО СТРОЕНИЯ

CHAPTER VI. CONDITIONS FOR THE FORMATION AND EXPLOITATION OF GEOTHERMAL AND HYDROCARBON DEPOSITS OF COMPLEX STRUCTURE

УДК 553.493.34:551.242.5

Геологическая модель формирования Ангаро-Ленского месторождения промышленных литиеносных рассолов – геодинамический, гидрогеохимический аспекты

**А.Г. Вахромеев^{1,8}, М.А. Данилова^{2,8}, Д.А. Погребная³, А.В. Сергеева⁴, Д.О. Мамаков⁵,
А.Т. Корольков⁶, А.В. Кирюхин⁴, Е.Д. Михеева⁷**

¹*Институт земной коры, Иркутск, Россия
andrey_igp@mail.ru*

²*ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть», г. Красноярск, Россия*

³*Москва, «Энерджи Крафт»; Россия*

⁴*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*

⁵*ООО «Сибгаз», Иркутск, Россия;*

⁶*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*

⁷*ФГБУ «ВИМС», г. Москва*

⁸*Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск, Россия*

Сибирская платформа (СП) – крупнейшая литиеносная металлогеническая провинция мира. Плюм тектоника – ключ к изучению специальной металлогении лития Сибирского кратона с современных геодинамических позиций. Однако геологические и геодинамические условия, при которых литий поступал в промежуточные магматические очаги верхней коры и в рассолы, изучены недостаточно. На примере одного из месторождений – Ангаро-Ленского – рассмотрены генезис, вероятные мантийные и коровые источники неогерентного лития, и процессы его накопления в осадочном чехле до высоких концентраций.

Ключевые слова: Сибирская платформа, металлогения лития, магматический очаг, рассолы

Geological model of formation of the Angara-Lena deposit of industrial lithium brines – geodynamic, hydrogeochemical aspects

**Andrey G. Vakhromeev^{1,8}, Maria A. Danilova^{2,8}, Darya A. Pogrebnaya³, Anastasia V. Sergeeva⁴,
Denis O. Mamakov⁵, Alexey T. Korolkov⁶, Alexey V. Kiryukhin⁴, Ekaterina D. Mikheeva⁷**

¹*Institute of the Earth's Crust, Irkutsk, Russia*

²*ООО "RN-Krasnoyarsk Oil Company", Krasnoyarsk, Russia*

³*Moscow, Energy Craft; Russia*

⁴*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

⁵*ООО Sibgaz, Irkutsk, Russia;*

⁶*Irkuta State University, Irkutsk, Russia*

⁷*FGBU «VIMS», Moscow*

⁸*Irkuta State Technical University, Irkutsk, Russia*

The Siberian Platform (SP) is the largest lithium-bearing metallogenic province in the world. Plume tectonics is the key to studying the special lithium metallogeny of the Siberian craton from modern geodynamic positions. However, the geological and geodynamic conditions under which lithium entered the intermediate magmatic foci of the upper crust and into brines have not been sufficiently studied. The genesis, probable mantle

and crustal sources of incoherent lithium, and the processes of its accumulation in the sedimentary cover to high concentrations are considered on the example of one of the deposits – Angaro-Lensky.

Keywords: Siberian platform, lithium metallogeny, magmatic center, brines

Известно, что литий образует промышленные концентрации в трех формациях экзогенного цикла: в вулканогенно-осадочных, в корах выветривания на нефелиновых сиенитах и в природных рассолах (*Геохимия...*, 1964; *Солодов*, 1978). Очевидно, что для анализа роли главных циклов формирования ресурсной базы гидроминерального литиеносного сырья имеет смысл раздельно, поэтапно рассматривать процессы поступления первично эндогенного лития из магматических пород в бассейн осадконакопления, процессы эволюционного концентрирования «вода-порода» в хлоридных рассолах, и как самостоятельный цикл выделить аномальные, импульсные процессы тектоно-вулканической деятельности на территории СП (*Фон-дер-Флаасс и др.*, 2000; *Кирюхин*, 2022), которые привели к кратному увеличению концентрации лития в рассолах средней, соленосной формации осадочного чехла.

Литий является типичным редким элементом для пород кислого состава, содержится в гранитоидах в повышенных количествах по сравнению с кларками земной коры, а с дериватами и постмагматическими образованиями гранитоидов (пегматитами, грейзенами, альбитизированными гранитами) часто связаны месторождения лития (*Геохимия...*, 1964; *Солодов*, 1978; *Летникова*, 2008). Но эндогенные месторождения не могут служить в полной мере основой формирования концентраций лития в осадочных толщах, а вероятно формируют лишь локальные вторичные ореолы концентраций (*Геохимия...*, 1964; *Солодов*, 1978) данного элемента в близлежащих глинистых породах, т.к. при выветривании эндогенных месторождений литий сорбируется из воды коллоидными частичками глин, прочно входит в их кристаллические решетки. В итоге то количество лития, которое привносится в седиментационный процесс эндогенными месторождениями совершенно ничтожно по сравнению с его общим количеством, высвобождающимся при выветривании изверженных пород.

Активная миграция лития в поверхностных условиях ограничена, литий ассоциирует с глинами еще в пределах зоны выветривания, и в морскую воду попадает уже в связанной форме, поэтому в большинстве случаев этот элемент мигрирует «пассивно», находясь в глинистых взвешах. Таким образом, содержание лития в природных рассолах глубоких горизонтов Сибирского бассейна осадконакопления, вероятно, «регулировалось» тем количеством лития, что привносилось в ионной форме. И ограничивалось сорбцией его глинистыми минералами донных осадков при превышении ими определенного уровня ($2 \cdot 10^{-5} \%$). При образовании глинистых отложений литий особенно легко входит в трехслойные пакеты минералов группы гидрослюд – монтмориллонит, необычно высокое содержание лития отмечается в гекторитах (литиевый монтмориллонит), и в некоторых содержаниях марганца. Учитывая, что глинистые породы составляют около 60–65% от всей массы осадочных пород, а содержание лития в них повышенное, соответственно, основное количество лития в осадочном чехле первично связано с глинистыми породами. В процессе эволюционного уплотнения осадков в бассейне, отжима конденсационной воды происходит перемещение воды и, соответственно, иона лития, в сопредельные породы-коллекторы. Важно учитывать, что ион лития, обладающий сравнительно высокой энергией гидратации, будет вытесняться из сорбента другими щелочными и щелочноземельными элементами, что приведет к увеличению его концентрации в подземных водах.

В дальнейшем, в процессе испарительного концентрирования морской воды солеродных бассейнов щелочные элементы длительное время сохраняются в растворе. Рубидий и цезий соосаждаются с калийными солями, особенно с карналлитом, литий же способен концентрироваться в рассолах до эвтоники. Таким образом, концентрирование редкометальных бромолитиевых рассолов до состояния эвтектики/эвтоники проходило по стадиям: эвакуации лития из магматических горных пород фундамента и терригенных толщ

протерозоя и венда – обмен в системе «вода-порода» (Шварцев, 1977); формирования эвапоритовых бассейнов с концентрированием рассолов-рапы до галитовой и карналлитовой составляющих. Накопление лития в осадках засоленных озер и лагун и в рассолах сопровождалось значительными событиями, обусловленными соляной и шарьяжно-надвиговой тектоникой, связанной с развитием сложных конвергентных границ при закрытии Палеоазиатского океана.

Экспериментальными исследованиями по испарительному концентрированию морской воды были установлены максимальные концентрации редких щелочных элементов в продуктах ее сгущения (мг/дм³): Li 30, Rb 10, Cs 1. (Геохимия., 1964). Однако максимальные концентрации лития в предельно насыщенных рассолах СП достигает 700 мг/л, в рассолах саларов Южной Америки до 7000 мг/л. Объяснением таких высоких концентраций помимо испарительного концентрирования может служить модель влияния мантийного источника на осадочные породы и подземные воды, в них заключенные. Одна из важнейших стадий развития чехла объединяет процессы активизации, обусловленные рассеянным рифтогенезом, которые широко проявились на платформе в периоды кимберлитового и траппового магматизма, а также в постмагматические этапы гидротермальной деятельности вулканических аппаратов (Фон-дер-Флаасс и др., 2000; Кирюхин, 2022). Эти этапы были катализатором импульсной геодинамической эволюции состава флюидных систем вулканогенно-осадочного чехла кратона, способствовавших обогащению рассолов щелочными металлами. Обогащение шло в процессе вулканической деятельности, которая протекала на гигантской территории платформы, что предполагает магматогенный, ювенильный источник флюидов и редких металлов, включая некогерентные литий, бор. В результате внедрения магмы в природные резервуары чехла по механизму ГРП происходило вскипание и удаление воды как растворителя в виде пара с повторным обогащением литием и другими редкими элементами из следующих порций «по циркуляции». Высокими давлениями обусловлено внедрение кипящих пересыщенных рассолов в межсолевые карбонатные пласты коллекторов в области апикальных частей трапповых силлов и секущих интрузий. Изоляция циркулирующих гидротермальных рассольных систем шла при остывании базальтовой магмы и формировании долеритовых силлов с консервацией (Кирюхин, 2022) этих залежей кепроком. Дальнейшее повышение давления флюидов приводило к авто-ГРП, и перетоку в новые трещинные системы в межсолевых карбонатных коллекторах.

Известно, что на Сибирской платформе отмечаются зоны с аномально-высокими пластовыми давлениями (АВПД) флюидов, где скважины фонтанируют рассолами с дебитами до 5000-7000 м³/сут (Алексеев и др., 2014). Это область связана с границей закрытия Палеоазиатского океана, локализована в пределах Ангара-Ленского артезианского бассейна, и трактуется авторами как одноименное Ангаро-Ленское месторождение промышленных металлоносных бром-содержащих рассолов. Здесь, на основе интерпретации современных данных сейсморазведки, фиксируются пограничная область гигантского Усольского силла с северо-запада, и шарьяжно-надвиговые структуры Байкало-Патомского складчато-надвигового пояса (Вахромеев и др., 2006) с юго-востока (рис. 1). В этой пограничной области бурением выявлены перспективные зоны с АВПД предельно насыщенных рассолов с высокими концентрациями редких металлов – лития, рубидия, цезия. Разработка соподчиненности, иерархии понятий «рудноносная гидроминеральная провинция – субпровинция (металлогеническая зона) – рудный район – месторождение» (Фон-дер-Флаасс и др., 2000) применительно к гидроминеральному сырью будет представлена авторами в докладе.

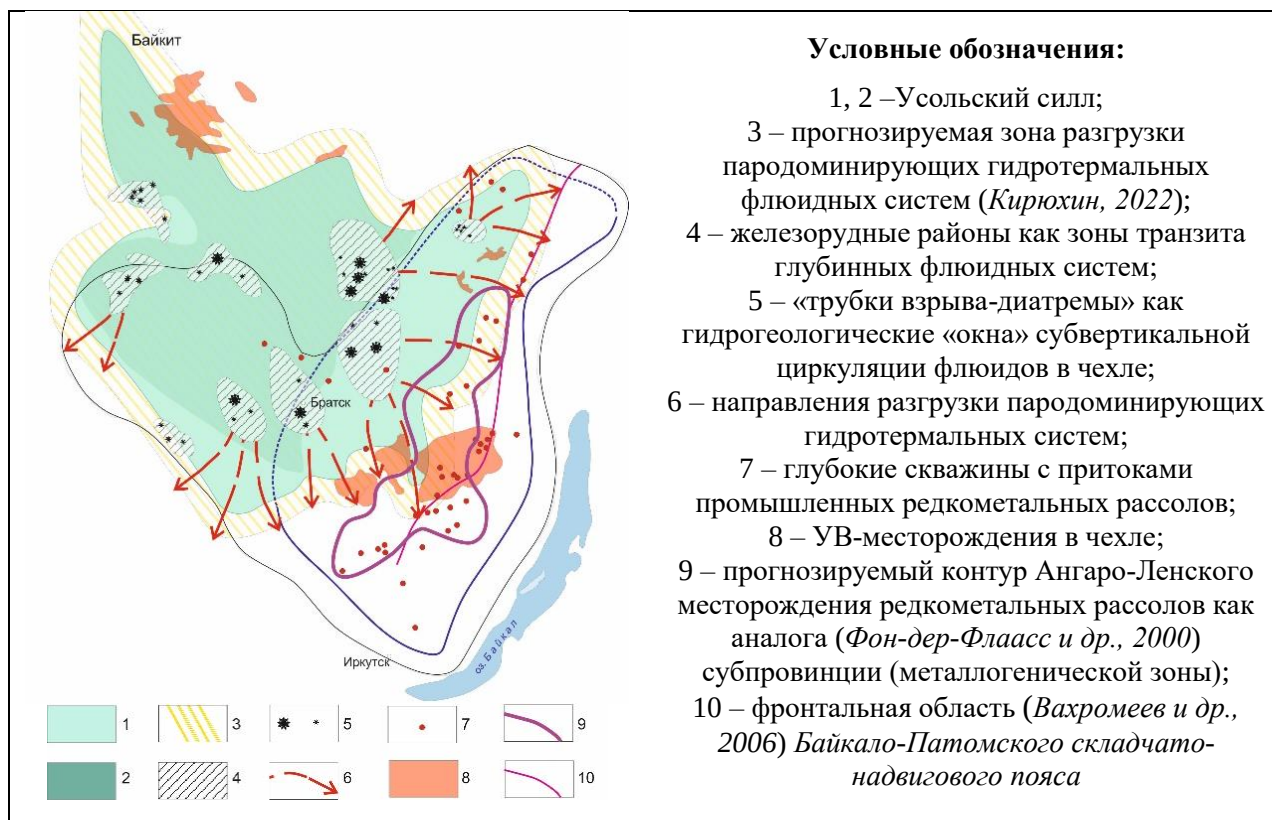


Рисунок 1 – Магматогенно-гидротермальная модель преобразования природных резервуаров и флюидных систем осадочного чехла под воздействием магмы Усольского силла.
Подготовлено: Вахромеев А.Г., Данилова М.А.

Выводы

Рассмотрены мега - процессы сохранения и разрушения залежей рассолов с литием. На процессы накопления лития в осадках засоленных лагун и в рассолах наложились масштабные события, обусловленными соляной и шарьяжно-надвиговой тектоникой, связанной с развитием сложных конвергентных границ при закрытии Палеоазиатского океана, континентальным базальтоидным и кимберлитовым магматизмом. Концентрирование редкометальных бромо-литиевых рассолов до состояния эвтектики/эвтоники происходило в несколько стадий: 1) эвакуации лития из магматических горных пород фундамента и терригенных толщ протерозоя и венда – обмен в системе «вода-порода»; 2) формирование эвапоритовых бассейнов с концентрированием рассолов-рапы до галитовой и карналлитовой составляющих, 3) на этапах платформенного магматизма – вскипание и удаления воды как растворителя в виде пара с повторным обогащением литием и другими некогерентными элементами из следующих порций «по циркуляции», 4) внедрение кипящих пересыщенных рассолов в межсолевые карбонатные пласты коллекторов в области апикальных частей трапповых силлов и секущих интрузий с консервацией этих залежей кепроком (Кирюхин, 2022), 5) закрытие циркулирующих гидротермальных рассольных систем (Кирюхин, 2022) при остывании базальтовой магмы и формировании долеритовых силлов. В этом цикле дальнейшее повышение давления флюидов приводило к авто-ГРП и перетокам в новые трещинные системы в межсолевых карбонатных коллекторах раннего кембрия. Изучение шарьяжно-надвиговых структур (Вахромеев и др., 2006; Кирюхин, 2022) на основе интерпретации современных данных сейсморазведки показало перспективность обнаружения трещинных резервуаров в поднадвиговых зонах – инъективных тел «рапа-силлов», т.е залежей литиеносного гидроминерального сырья.

Заклучение

Анализ геодинамической эволюции Сибирского кратона и окружающих его аккреционно-коллизийных областей для миграции и накопления лития позволяет сделать следующие выводы: 1) чехол кратона импульсно обогащался литием в рифее, венде и нижнем кембрии; 2) первоначальное поступление лития произошло в авлакогены и связано, вероятно, с расколом Родинии над горячей областью мантии и зарождением Палеоазиатского океана; 3) наиболее высокие концентрации лития формируются в два этапа: *в венде, и раннем кембрии* при формировании синеклиз в начале образования плитной стадии чехла, когда Сибирский кратон находился в южном полушарии вблизи южного тропика; *в перми и триасе*, когда происходили эпигенетические изменения под действием двух независимых процессов – гидротермального обогащения из мантийного и промежуточного источников вещества и кипения рассолов над расплавленными силлами; 4) *залежи наиболее концентрированных предельно насыщенных рассолов локализованы над силлами*, внедрявшимися в осадочный чехол в процессе траппового магматизма, и *тяготеют в плане к краевым областям выклинивания магматических тел (силлов)*; 5) *ловушки в межсолевых карбонатных природных резервуарах с высокими концентрациями лития в рассолах сформированы чешуйчато-надвиговыми структурами* солевого и надсолевого комплексов осадочного чехла.

Рассмотренная геохимическая, металлогеническая система с длительным геологическим циклом эволюции химического состава природной «смеси» седиментологических, глубоко метаморфизованных и гидротермально преобразованных редкометальных рассолов занимает особое место в специальной металлогении-минерагии лития, относительно мало изучена. Исследование ориентировано на поиск генетических связей металлоносности рассолов Сибирской платформы с плюм- и плей- тектоникой, эволюцией глубинных структура кратона и платформенным магматизмом.

Список литературы

1. *Алексеев С.В.* Промышленные рассолы Сибирской платформы: гидрогеология, бурение и добыча, переработка, утилизация // *С.В. Алексеев, А.Г. Вахромеев, Н.П. Коцупало, А.Д. Рябцев* // Иркутск: Изд-во ООО «Географ». 2014. 162 с.
2. Геохимия, минерагии и генетические типы месторождений редких элементов. Т.1. Геохимия редких элементов. Наука, Москва, 1964. 674 с.
3. *Солодов Н.А.* Минерагии литофильных редких металлов. М. Недра. 1978. 175 с.
4. *Шварцев С.Л.* О формировании крепких и предельно насыщенных подземных рассолов. Проблемы соленакопления. Т.1. Новосибирск: Наука. 1977. С. 192–195.
5. *Фон-дер-Флаасс Г.С.* Атлас структур рудных полей железорудных месторождений / *Г.С. Фон-дер-Флаасс, В.И. Никулин* // Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2000. – 192 с.
6. *Вахромеев А.Г.* Роль шарьяжно-надвиговой тектоники в формировании аномально-высоких пластовых давлений и промышленных металлоносных рассолов Сибирской платформы / *А.Г. Вахромеев, В.А. Сизых* // Доклады РАН. - 2006. - № 2. - С. 1–5.
7. *Летникова Е.Ф.* Геохимические типы карбонатных отложений южного обрамления Сибирской платформы // Автореф. дисс... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск. 2008.
8. *Кирюхин А.В.* Геомеханические условия формирования вулканических и гидротермальных систем // Geothermal Volcanology Workshop 2022). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022. С. 9–13.