

## Геолого-генетическая модель, поисковые критерии и признаки месторождений литиеносного гидроминерального сырья

Рассмотрены гипотезы формирования высокоминерализованных редкометалльных вод и механизм накопления лития в гидроминеральном сырье. Приводятся различные подходы к условиям формирования как самих литиеносных вод, так и к возможным источникам поступления в них лития. Обобщены и сформулированы основные критерии поиска литиеносного гидроминерального сырья. Предложена предварительная геолого-генетическая модель накопления лития в гидроминеральном сырье.

*Ключевые слова:* литий, гидроминеральное сырьё, высокоминерализованные редкометалльные воды, гипотеза, формирование, поисковые критерии, геолого-генетическая модель.

МИХЕЕВА ЕКАТЕРИНА ДМИТРИЕВНА, ведущий специалист<sup>1</sup>, mikheeva.ed@vims-geo.ru

КУЗЬМЕНКО ПЁТР СЕРГЕЕВИЧ, специалист<sup>1</sup>, kuzmenko@vims-geo.ru

КЛЮЧАРЕВ ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ, начальник отдела<sup>2</sup>, sacsaul@gmail.com

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского» (ФГБУ «ВИМС»), г. Москва

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов» (ФГБУ «ИМГРЭ»), г. Москва

## A geological-genetic model and the prospecting criteria and guides offields of lithium-bearing hydromineral raw materials

E. D. MIKHEEVA<sup>1</sup>, P. S. KUZMENKO<sup>1</sup>, D. S. KLYUCHAREV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Institution «All-Russian Scientific Research Institute of Mineral Raw Materials named after N. M. Fedorovsky» (FSBI «VIMS»), Moscow

<sup>2</sup> Federal State Budgetary Institution «Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements» (FSBI «IMGRE»), Moscow

Various models of formation of highly mineralized rare metal-bearing waters, possible sources of their contained lithium, and mechanisms of its accumulation in the hydromineral raw materials are considered. The main criteria of searching for the lithium-bearing hydromineral raw materials are generalized and formulated. A preliminary geological-genetic model is proposed for the lithium accumulation in the hydromineral raw materials.

*Key words:* lithium, hydromineral raw materials, highly mineralized rare metal-bearing waters, lithium-bearing brines, hypothesis, formation, prospecting criteria, geological-genetic model.

Гидроминеральное сырьё (далее – ГМС) является источником таких элементов, как литий, рубидий, стронций, цезий, бром и бор. Кроме того, ГМС практически всегда сопровождает углеводородные месторождения.

В рамках исследования условий накопления лития в гидроминеральном сырье были учтены основные (в том числе и смежные) теории и гипотезы образования высокоминерализованных редкометалльных вод, залежей солей, углеводородов.

**Краткий обзор гипотез формирования литиеносного ГМС.** К настоящему времени применительно к гидроминеральному сырью модели его образования можно разделить на две группы («классы»): экзогенные и эндогенные.

Процессы экзогенного формирования глубоко-залегающих высокоминерализованных подземных вод, в свою очередь, описываются следующими моделями:

- определяемыми физическими свойствами расолов – седиментационной, подземного испарения

и выщелачивания, гравитационной дифференциации;

- определяемыми химическими свойствами рассолов и растворённых соединений – осмотической, трансляционной.

Собственно, *седиментационная* гипотеза формирования подземных вод предложена в начале двадцатого века (1902–1908 гг.) Н. И. Андрусовым, Г. Гефером и А. Ч. Лейном, которые пришли к ней независимо друг от друга.

Позже В. И. Вернадский [1] отмечал, что воды зародились из тех подземных вод, которые остались в осадочных породах при их образовании, а также при диагенезе морских илов и растворении каменной соли. В этой же работе В. И. Вернадский писал: «В подцарстве пластовых вод стратисферы различимы сейчас три семейства – пластовые воды, пластовые воды нефтяных месторождений, метаморфизованные воды стратисферы».

К седиментационной гипотезе относится и теория галогенеза, предусматривающая наличие погребённых солеродных бассейнов.

Гипотеза *подземного испарения* вод под воздействием эндогенного тепла, а также гидратации солей была озвучена А. В. Сулиным.

*Е. В. Пиннекер* [8] писал о том, что преобразование первичных рассолов выщелачивания происходило под влиянием факторов катионного обмена и восстановительных процессов.

Гипотеза *гравитационной дифференциации и осаждения ионов*, предложенная К. В. Филатовым, предполагает сохранение вод в глубинных слоях благодаря более высокому удельному весу (1,2–1,3 кг/дм<sup>3</sup>). В процессе гравитационной дифференциации на большую глубину опускаются те анионы, которые обладают большей ионной плотностью и меньшими размерами радиуса.

*Осмотическая гипотеза* озвучена Н. П. Палеем и сводится к тому, что движение вод по горным породам можно приравнять к движению вод по коллоидальным полупроницаемым мембранам. При этом процессе происходит повышение концентрации различных элементов в ГМС.

*Трансляционная гипотеза*, рассматриваемая С. Я. Самойловым, предполагает, что вертикальная гидрохимическая зональность объясняется скачкообразным (трансляционным) движением ионов и молекул воды, зависящим от энергии активации, необходимой для преодоления притяжения смежных частиц в зависимости от глубины залегания подземных вод.

Общим свойством отмеченных экзогенных гипотез является участие в процессе внешней (атмосферной, поверхностной) воды как растворителя и переносчика растворённых солей.

Иная картина наблюдается в «классе» эндогенных гипотез образования рассолов. Если для экзогенного «класса» поступление солей в раствор связывается с процессами выветривания и растворения горных пород, то предполагаемыми источниками солей в эндогенном «классе» служат магматические породы и магматогенные литиевые растворы.

Применительно к литию цепочку формирования, перехода и миграции – «генетический ряд» (от глубинного к поверхностному и от раннего к позднему) – можно построить следующим образом: мантия – рудно-магматические и флюидные системы – соли, расплавы и рассолы.

Литиевые металлогенетические 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. Формирование гидроминеральных месторождений лития, вероятнее всего, обусловлено привнесением  $Li_2O$  из мантии в составе контрастных субщелочных рудно-магматических систем (через гидротермы и травертины на дневную поверхность) [9].

*Власов Г. М.* в своей статье писал: «Большое внимание уделяется явлению дегазации вещества мантии Земли, восстановленным продуктам этой дегазации, развитию представлений о мантийной флюидной системе. Не меньшего внимания заслуживает коровая флюидная система с водными окисленными соединениями, выраженная тремя гидрохимическими зонами: наиболее *глубинной* – *хлоридной*, средней по глубинности – *сульфатной* и приповерхностной – *углекислой*» [2].

*Соколов С. В.* говорит о том, что обогащение магм флюидами способствует появлению солевых расплавов, составы которых во многом определяются химическими особенностями воздействующих флюидов. Флюидизированные магмы претерпевают расслоение с образованием различных силикатно-флюидно-солевых расплавов – щёлочно-фторидных, щёлочно-сульфатных, щёлочно-фосфатных, щёлочно-хлоридных и, пожалуй, более часто встречающихся обогащённых кальцием ( $\pm$  магнием) карбонатных. Результаты

многочисленных экспериментов свидетельствуют о перераспределении редких и рудных элементов в обогащённые хлором флюидно-магматические системы. Например, зафиксировано сосуществование окислого алюмосиликатного расплава с отделившимися хлоридсодержащим водным раствором и солевой высокохлоридной жидкой фазой [10].

*Андреева И. А.* в своём докладе озвучила то, что важным фактом изучения расплавных включений во вкрапленниках пантеллеритов Дзарга-Худукского комплекса стало обнаружение наряду с силикатными расплавами обогащённых Li фторидных расплавов. Это позволило доказать принципиальную возможность возникновения солевых расплавов, в значительной степени экстрагирующих Li, на заключительных стадиях дифференциации щелочных магм. Закономерности эволюции расплавов бимодальных ассоциаций Хархоринской рифтовой зоны (Центральная Монголия), близость возраста и состава пород последних позволяют предположить сходный для них механизм формирования, предполагающий накопление многих редких и редкоземельных элементов, а также летучих компонентов (F, H<sub>2</sub>O) в процессе кристаллизационной дифференциации. Высокий потенциал щелочей, а также летучих компонентов (F и H<sub>2</sub>O) в расплавах способствовали значительному концентрированию в них редких элементов. На поздних стадиях эволюции комендитовых и пантеллеритовых магм происходило отделение солевого фторидного расплава с высокими содержаниями Li [10].

*Созанский В. И.* предполагал, что высокоминерализованные воды возникали в верхней мантии в тех объёмах астеносферы, где выплавляется базальтовая магма. Горячие, насыщенные хлоридами рассолы поступали на поверхность, также как и базальты, по глубинным разломам. Рассолы накапливались во впадинах рельефа. При их охлаждении выделялся галит.

*Козарко Л. Н. и Рябчиков И. Д.* рассматривали поведение воды, фтора, хлора и углекислоты при дифференциации магмы. Обобщение экспериментальных данных привело исследователей к выводам о невысоком содержании воды в базальтовых магмах и о том, что «летучие компоненты выносились на поверхность Земли будучи растворёнными в магматических расплавах и их отделение происходило в самых верхних зонах земной коры». При продвижении магмы через обводнённые породы земной коры вода интенсивно поглощает

ся и выделяется при остывании базальтовой магмы или продуктов её коровой дифференциации. Возникшие хлоридные рассолы в земной коре легко образуют комплексные соединения с рассеянными металлами магмы или пород, по которым они перемещаются [7].

*Баранов И. Г.* предполагает проникновение в солеродные бассейны газообразных продуктов вулканизма. Он пишет: «По подсчетам, количество газообразных продуктов, выделяемых вулканами, настолько велико, что оно соизмеримо со всеми твёрдыми вулканическими образованиями, которые выносятся на земную поверхность. Естественно, что в результате колоссальных выбросов газа за счёт дегазации глубинных зон или верхней мантии Земли сильно повышалась концентрация солей в солеродных водоёмах. Характерна приуроченность почти всех соленосных провинций земного шара к зонам глубинных разломов, по которым осуществлялась интенсивная вулканическая деятельность. В период накопления соленосных формаций почти всюду происходили изменения базальтов и диабазов». Впадины рифтовых зон связаны с грабенами на сводах антиклинальных структур, и в этих условиях соленакопление и вулканизм могут осуществляться одновременно.

*Калинко М. К.* полагал, что соленакопление происходит как в периоды интенсивной вулканической деятельности, так и непосредственно после них. Солевой состав солеродных водоёмов формируется не только за счёт хлора, непосредственно поступавшего в водоём, а в значительно большей степени за счёт продуктов выветривания вулканогенных пород, подвергшихся воздействию хлора.

*Ворон Е. Е.* считал, что основным источником элементов, входящих в состав галогенных формаций, вероятнее всего, служили магматогенные летучие, а также газы и флюиды, образующиеся при метаморфизации осадочных пород, вмещающих глубинные магматические тела типа батолитов.

В работе американских исследователей предполагалось, что источник Li возникает в результате изменения вулканических пород гидротермальными флюидами и (или) в результате прямого поступления из дифференцированных магматических источников [11].

Китайскими геологами проведены гидрохимические исследования по ста пятидесяти пяти нефтяным скважинам, вскрывающим отложения

от эоцена до нижнего олигоцена. Обогащение Li рассолов Цяньцзяна, вероятно, связано с геотермальными источниками, в свою очередь связанными с вулканической деятельностью.

В 1960-х гг. *Порфирьев В. Б. и Кудрявцев Н. А.* – крупные специалисты в области нефтяной геологии и сторонники глубинного (мантийного) происхождения нефти – утверждали, что пространственные совпадения нефтяных месторождений с соленосными сериями отражают генетическую связь. Другими словами, рассолы (как вода, так и соли), на базе которых были созданы соляные породы, имеют глубинное, точнее мантийное, происхождение.

*Порфирьев В. Б.* писал: «Никакие выпаривающиеся бассейны не в состоянии дать такой массы солей. И единственное объяснение – это длительный привнос соли в аккумулярующие бассейны в форме богатых рассолов, поступавших по глубинным разломам».

Несколько позже *Порфирьев В. Б.* начал развивать представления о выносе из больших глубин по разломам готовых соляных масс, внедрявшихся под колоссальным давлением не только в бассейны, но и непосредственно в осадочный чехол, образуя при этом диапировые структуры.

*Кудрявцев Н. А.* в ряде своих работ подчёркивал, что связь между нефтью и солями не только пространственная, но и генетическая. «Поскольку эндогенное происхождение нефти уже давно доказано, то естественно, что и ископаемые соли надо связывать с глубокими недрами. Соляные рассолы из недр поступают в земную кору по глубинным разломам». Он также отрицал связь галогенеза с климатом и был уверен, что соляные породы образуются на глубине в толще земной коры за счёт поднимающихся «горячих пересыщенных» хлоридных рассолов, которые из трещин проникали по плоскостям наложения и выделяли соли в связи с понижением температуры. Слоистость соли «может быть объяснена периодическим поступлением рассолов с глубины или незначительным изменением в их составе». Позже он предположил и широкое проявление метасоматоза по глинисто-карбонатным и карбонатным породам. Карбонаты замещаются ангидритом, а последний – галитом.

К известным месторождениям нефтепромысловых рассолов относятся: юрская формация Смаковер в бассейне побережья Мексиканского залива, район Фокс Крик (бассейн Альберта, Канада),

а также палеогеновые и неогеновые формации в западной части бассейна Кайдам в Китае [12].

Отдельно стоит отметить гипотезу о планетарной «гидрохлоросфере» *Дерпгольца В. Ф.* Согласно этой гипотезе, гидрохлоросфера – часть гидросферы, имеющая свои пространственно-геохимические особенности, охватывающая все природные минерализованные воды и имеющая первичный генезис. Характерной чертой гидрохлоросферы является её существование во всём диапазоне глубин (до верхней мантии включительно), температур и давлений.

*Крайнов С. Р. с соавторами* рассматривал воды в надкритическом состоянии, которые залегают на больших глубинах (5–10 км) и существуют при температуре выше критической точки воды (374 °С, 22,5 МПа). Высказана гипотеза глобального флюидного дыхания мантии в виде автономного потока летучих, поставляющего в земную кору водно-углекислый флюид [4].

*Коржинский Д. С.* писал о потоке сквозьмагматических флюидов, которые образуются при кристаллизации магм, при термо- и динамометаморфизме. Это могут быть минерализованные, богатые металлами растворы, участвующие в гидротермальном рудообразовании.

*Зайцев И. К.* считал, что глубина распространения жидких вод в большинстве структур ориентировочно варьирует в пределах 8–20 км, а глубже распространены преимущественно газопаровые флюиды.

По мнению *Костенко Л. М.*, редкие щелочные металлы имеют глубинное происхождение и выводятся из глубин в пластовые воды по долгоживущим разломам в виде возгонов, конвективными токами и диффузией. Для накопления и сохранения высоких концентраций редких щелочных металлов в водах необходим надёжный перекрывающий водоупор. Максимальная концентрация редких щелочных элементов в водах сосредоточена на границе переходной осадочной толщи с кристаллическим основанием. Связь между содержанием редких щелочных металлов в водах и литологией водовмещающих пород не установлена.

*Гирич Ю. П.* и др. изучали распределение редких и рассеянных элементов в осадках ранне-среднеплейстоценового бассейна Кавказской геосинклинали. Исследователи предположили, что литий накапливается в глинистых минералах в континентальных условиях за счёт сорбции его при

выветривании первичных руд. Концентрация лития в водах происходит при выходе металла из кристаллических решёток метаморфизованных глинистых минералов (монтмориллонитов).

Важную роль в формировании повышенных концентраций редких металлов в подземных водах играют растворённые газы. В.И. Вернадский особое значение придавал углекислоте, кислороду, азоту, сере [1].

*Соколов В.Д.* указывал на связь между нефтью, в которой присутствовали вулканические газы (углекислота, сероводород), и различными вулканогенными минералами (галит, гипс, сера).

*Кост Е.* писал, что во всех без исключения нефтеносных районах наблюдается одна и та же ассоциация, в основном соль, сера и углеводороды (это верно лишь для некоторых соляных куполов), а в более поздней статье добавил в ассоциацию также горячие карбонатные и кремнистые воды.

*Кудрявцев Н.А.* в своей книге писал: «Более широко, чем нефть и твёрдые битумы, распространены в кристаллических породах, а также фундаменте древних плит углеводородные газы. Такие газы встречаются не только в рудниках, разрабатываемых месторождения тяжёлых металлов различного, преимущественно гидротермального, происхождения, но и в алмазоносных кимберлитовых трубках» [5].

Исследования *Маринова Н.А.* на Азиатском и Африканском континентах привели его к выводу, что вертикальная гидрохимическая зональность является планетарной закономерностью. Она характерна не только для артезианских бассейнов платформ, но и для трещинных вод щитов, складчатых областей, в которых на глубине также обнаружены хлоридные рассолы, как и при бурении Кольской сверхглубокой скважины. В зоне регионального стока основная масса подземной воды образуется под влиянием экзогенного водообмена, а формирование подземных вод в нижних зонах носит явно эндогенный характер [3].

Следует отметить, что в Кольской сверхглубокой скважине исследована насыщенная флюидами зона разуплотнения на глубинах от 5 до 10 км, в которой происходил постоянный приток воды. Во вмещающих породах был обнаружен диоксид углерода (в большей степени в нижней части разреза), углеводороды и азот (в верхней части разреза). Ниже глубины 7500 м выявлена зона с высоким давлением и наличием высокоминерализованных вод [3].

### *Геолого-генетическая модель, прогнозно-поисковые критерии и признаки литиеносного ГМС.*

*В общем виде все гипотезы накопления лития в ГМС авторы данной статьи сводят к двум укрупнённым моделям, которые объясняют и источник самого металла – экзогенный и эндогенный.*

Согласно экзогенной модели литий поступал из рудных месторождений и переотлагался в морских или континентальных галогенно-эвапоритовых формациях (салары и палеосалары). Далее происходило захоронение продуктов испарения под более молодыми осадками. После чего вступают в силу процессы вторичной концентрации лития с процессами метаморфизации подземных вод и выщелачивания вмещающих пород, где литий переносится и осаждается на геохимических и сорбционных барьерах [6].

Экзогенная модель характеризуется следующими критериями и признаками:

- ареал распространения галогенных (эвапоритовых) формаций, рассматриваемых как палеосалары, который является областью первичного накопления рассеянных, летучих и щёлочноземельных элементов;
- наличие лагун морского типа и аридного климата;
- литиеносные горизонты тяготеют к фациальной границе двух мелководно-морских зон: шельфовой с переменной солёностью и зоной повышенной солёности на сульфатном барьере;
- повышенные концентрации лития, располагающиеся на определённых стратоевнях (нижний кембрий – Восточно-Сибирская гидроминеральная провинция (далее – ГМП); пермская и девонская система – Оренбургская ГМП; карбон-пермь – Тимано-Печорская ГМП; юрская система – Западно-Сибирская, Предкавказская, Крымская ГМП);
- наличие поля развития основных силлов, контролирующих размещение сульфатного барьера и оказывающих влияние на образование гекторита;
- образование поднятий (в т.ч. палео), контролирующих выщелачивание из галогенных формаций, или, наоборот, прогибов, сохраняющих в «запечатанном» виде галогенные формации.

*Эндогенное происхождение* подземных высокоминерализованных вод предполагалось Дерпгольцем В.Ф., Виноградовым А.П., Коржинским Д.С. и другими исследователями. Согласно данной модели, летучие (хлор, бром, йод и др.) поднимаются из мантии через породы, слагающие фундамент



Рис. Предварительная схема формирования литиеносного ГМС

бассейнов, и вследствие диффузионной дифференциации задерживаются, а вода уходит выше.

Установлено, что зоны, вмещающие литиеносные рассолы, тяготеют к границе фундамента платформ и осадочного чехла на участках пересечения глубинных разломов или на крыльях валов.

*Эндогенная модель характеризуется следующими признаками:*

- наличием региональных и локальных водоупоров (терригенный, галогенный тип);
- наличием зон пересечения разломов в фундаменте;
- привносом рассеянных элементов из глубинных зон (мантий?);
- наличием повышенных концентраций лития в породах фундамента;
- наличием областей затрудненного водообмена;
- наличием силлов и траппов в соляных толщах.

На основе анализа приведённой выше информации авторами составлена предварительная схема формирования литиеносного ГМС (см. рисунок). Модель предполагает привнос рассеянных элементов по зонам глубинных разломов фундамента платформы, их накопление и сохранение под региональными и локальными водоупорами в зонах затруднённого водообмена. Прогнозно-поисковые критерии и признаки литиеносного гидроминерального сырья обобщены в таблице.

**Выводы.** Изложенные в статье материалы, по мнению авторов, позволяют пересмотреть представления о галогенном генезисе ГМС и предложить модель полигенно-полихронного концентрирования лития с участием эндогенных источников вещества. Вопрос об источниках лития в ГМС требует дальнейшего изучения.

Отмечена приуроченность времени формирования соленосных толщ к вулканически активным периодам в истории развития земной коры и районам, расположенным вблизи центров тектономагматической активности. При этом не исключается гипотеза привноса лития по разломным зонам после формирования осадочного чехла.

Предполагается генетическая связь между пегматитами, гекторитами и литиеносным ГМС. Гекториты служат продуктом распада пегматитов и могут повторно подвергаться промыву и выходу лития в раствор, при этом глубокозалегающие редкометалльные воды могут насыщаться литием за счёт пород фундамента.

На дневной поверхности литиевые провинции представлены саларами и высокоминерализованными озёрами, образующимися за счёт кислотного выщелачивания вулканических пород, имеющих мантийно-коровое происхождение. Поступление высококонцентрированных хлоркальциевых рассолов происходило в солеродные водоёмы из глубоких зон застойного режима или магматических очагов.

Соленакпление происходит в рифтовых зонах одновременно с проявлениями вулканизма. В ряде мест континентального соленакпления в районах развития вулканогенных пород в накоплении солей участвуют и продукты выветривания.

Установлена пространственная связь месторождений нефти и газа с объектами ГМС.

Взаимодействие вод с эвапоритами не является универсальным решением проблемы происхождения подземных рассолов. Солёные воды известны в бассейнах, где отсутствуют эвапориты (Тарумовская площадь в Дагестане), и, кроме того, литий может отсутствовать в подземных водах при наличии галогенных формаций.

Зарубежные исследователи в большинстве публикаций связывают повышенные содержания лития в подземных и поверхностных водах с пластовыми залежами эффузивов (преимущественно базальтов), туфов, туффитов, а не только с соляными отложениями. Местами вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы, среди которых находятся соляные залежи, метаморфизованы и замещены гидрослюдами, хлоритом, монтмориллонитом и другими вторичными минералами.

Исследование процессов накопления лития в гидроминеральном сырье необходимо продолжать.

Таблица. Прогнозно-поисковые критерии и признаки литиеносного гидроминерального сырья

Металлогенические зоны				
Формационный критерий	Структурный критерий	Палеогеографический критерий	Тектонический критерий	Стратиграфический критерий
Наличие галогенных формаций (палеосаларов или эвапоритов). Сибирская платформа, Хагангский прогиб и Виллюйская синеклиза, Московская синеклиза, Днепровско-Донецкая впадина, Предуральский прогиб, Прикаспийская синеклиза, Предкавказье	Зоны, вмещающие литиеносные рассолы, тяготеют к границе фундамента платформ и осадочного чехла	Близость древних эндогенных рудных месторождений, проявлений, горных систем, сложенных специализированными на РЭ горными породами в обрамлении бассейна палеосалара	Завершающие этапы эпох тектономагматических активизаций. Наибольшие содержания Li отменяются в рассолах, приуроченных к активизированным участкам платформ. По мере увеличения степени активизации растёт содержание Li в рассолах солеродных бассейнов	Наибольшие концентрации Li характерны для кембрийских, нижнепермских и юрских отложений, в меньшей степени – девонских (Западная Сибирь – полупутные воды)

Рудные районы					
Формационный критерий	Структурный критерий	Палеогеографический и палеотектонический критерий	Магматический критерий	Минералогический критерий	Геохимический критерий
В перспективных зонах литиеносны только рассолы, вмещающие толщи которых залегают под/между/внутри соленосных толщ. Вмещающие формации: карбонатно-терригенная, гекторитовая, карбонатно-галогенная и терригенная	Повышенные концентрации Li тяготеют к инверсионным структурам в платформенных впадинах и краевых прогибах, к зоне сочленения авлакогена со складчатой структурой, к узлам пересечения субширотных разломов с меридиональными зонами, к крупным надвигам и валлобразным поднятиям	1. Наличие лагун морского типа и аридного климата или межторных бессточных впадин континентального типа. 2. Зоны развития карста, как экзогенного, так и внутрисоляного, свидетельствуют о процессах переноса и перераспределения вещества внутри осадочных комплексов	Зоны развития вулканизма, туфово-пепловые породы, продуктом преобразования которых могут быть глинистые отложения, сорбирующие литий. Эти породы также могут служить первичным источником лития (туфы триасового возраста на северном Кавказе, туфы Аkitканского хребта и т. д.)	Li подтвержен сорбции глинистыми частицами терригенных осадков, несущими отрицательный заряд. Особенно легко они входят в межпакетные пространства минералов гидрослюда-монтмориллонитовой группы, обладающих наиболее высокими адсорбционными свойствами. В результате этого происходит образование литиеносного минерала – гекторита	1. Концентрирование подсолевых и межсолевых рассолов. Последовательность: Cl-Na-Ca-Cl-Ca-Na-Cl-Ca-Mg-Cl-Ca. Основной концентрирующий катион Ca и Mg доминирует на последних стадиях стужения. 2. Концентрирование внутрисолевых рассолов. Последовательность: Cl-Na-Mg-Cl-Mg-Na-Cl-Mg-Cl-Mg-Ca-Cl-Ca-Mg

Рудные поля					
Структурный критерий	Палеофациальный и палеотектонический критерий	Метаморфический критерий	Структурно-тектонический критерий	Геохимический критерий	Стратиграфический критерий
<p>1. Наиболее высокие концентрации Li наблюдаются в антиклинальных поднятиях с наиболее высокой амплитудой, в локальных структурах концентрация последовательно растёт по восставанию пласта, достигая максимума в сводовой части под газовой залежью.</p> <p>2. Наличие проницаемых зон – разломов, зон трещиноватости, плоскостей сместителя надвигов, карстовых или пористых коллекторов, необходимых для нахождения в них рассолов.</p> <p>3. Наличие мощного регионального или локального водоупора (глины, соли)</p>	<p>Проявлены для литигеносных горизонтов, которые тяготеют к фациальной границе зон мелководно-морской шельфовой переменной солёности и мелководно-морской повышенной солёности на сульфатном барьере</p>	<p>Продолжительность формирования солеродного бассейна отражается в степени концентрации рассолов и РЭ в них. В зонах замедленного водообмена концентрации лития и других микрокомпонентов выше. Взаимодействие рассолов с вмещающими породами обеспечивает высокие концентрации лития и рубидия, которые невозможно получить при испарительном концентрировании морской воды</p>	<p>Приуроченность к зонам глубинных разломов, проявленных в фундаменте и осадочном чехле, их опережающим системам, узлам пересечения, которые обуславливают блоковое строение фундамента и предопределяют расположение локальных фациальных зон, зон трещиноватости и зон развития карста</p>	<p>Наличие геохимических барьеров. Граница основных силлов на Сибирской платформе контролирует размещение сульфатного барьера и оказывает влияние на образование гекторита. Границы фациальных зон могут являться геохимическим барьером</p>	<p>Приуроченность зон повышенных концентраций лития к стратиграфическим, определяемым перерывами в осадконакоплении и миграцией соляного бассейна, перемычками и переотложениями солеродных толщ</p>
Месторождение					
Формационный признак	Структурный признак	Геотермический (Термодинамический) признак	Прямые признаки		
<p>Вмещающая толща растворов залегает непосредственно под отложениями, вмещающими углеводородные залежи. Наиболее высокие содержания Li отмечаются в рассолах под газовыми залежами</p>	<p>Наличие зон аномально высокого пластового давления АВПД, которые приурочены к всящему крылу надвига – аллохтону, чешуйчатому вееру, реже – к собственно осевой части соляного вала, т. е. фронтальной зоне надвига</p>	<p>Повышенные концентрации лития в рассолах отмечаются в высокотемпературных зонах солёных бассейнов и палеосаларов, где формируются газоконденсатные залежи. Наличие аномалий геотермического градиента, определённого близостью магматического очага</p>	<p>Наличие повышенных концентраций лития в водах от 50 мг/л и наличие больших дебитов от 700 м<sup>3</sup>/сут. Наличие пониженного рН (1–5) и повышенного содержания CO<sub>2</sub></p>		

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вернадский В. И.* История минералов земной коры. – Т. 2 «История природных вод». Ч. 1. Вып. I–II. – Л. : ОНТИ ХИМТЕОРЕТ, 1936.
2. *Власов Г. М.* Флюидное «дыхание» земли и стратиформное оруденение // Тихоокеанская геология. – 1986. – № 5.
3. *Кольская сверхглубокая* : Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины / Гл. ред. Е. А. Козловский. – М. : Недра, 1984. – 490 с.
4. *Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н., Швец В. М.* Геохимия подземных вод. Теоретические, природные и экологические аспекты / Отв. ред. академик Н. П. Лавров. – М. : Наука, 2004. – 677 с.
5. *Кудрявцев Н. А.* Генезис нефти и газа. – Л. : Недра, 1973. – 216 с.
6. *Кузьменко П. С., Чмерев В. С., Михеева Е. Д.* Условия формирования и закономерности размещения литиеносных рассолов на территории РФ // Разведка и охрана недр. – 2023. – № 7. – С. 33–46.
7. *Основные проблемы соленакопления* : Сборник / Отв. ред. А. Л. Яншин, М. А. Жарков; АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т геологии и геофизики. – Новосибирск : Наука, 1977. – 317 с.
8. *Пиннекер Е. В.* Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна : (закономерности размещения, состав, динамика, формирование и использование) / АН СССР СО Институт земной коры. – М. : Наука, 1966. – 322 с.
9. *Владимиров А. Г.* [и др.] Геохимические тенденции концентрирования лития в Земной коре и на ее дневной поверхности [Электронный ресурс]. – URL: [http://shakhov.igm.nsc.ru/pdf/Shakhov120-pl129\\_134.pdf](http://shakhov.igm.nsc.ru/pdf/Shakhov120-pl129_134.pdf) (дата обращения 01.03.2024).
10. *Минералообразующие системы месторождений высокотехнологичных металлов: достижения и перспективы исследований.* Всероссийская конференция, проводимая в рамках мероприятий, посвященных 300-летию РАН. Москва, 29 ноября–1 декабря 2023 г. Материалы конференции [Электронный ресурс]. – URL : [http://www.igem.ru/300\\_ras/-files/abstracts.pdf](http://www.igem.ru/300_ras/-files/abstracts.pdf). (Дата обращения 07.03.2024).
11. *Munk L. A., Hynek S. A., Bradley D. C., Boutt D., Labay K., Jochens H.* Lithium Brines: A Global Perspective // *Reviews in Economic Geology*. – 2016. – V. 18. – P. 339–365.
12. *Xiaocan Yu, Chunlian Wang, Hua Huang, Jiuyi Wang.* Kai Yan Lithium and brine geochemistry in the Qianjiang Formation of the Jiangnan Basin, central China. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-31421-1>. (Дата обращения 04.03.2024).

## REFERENCES

1. *Vernadskiy V. I.* Istoriya mineralov zemnoy kory [History of minerals of the earth's crust], V. 2 Istoriya prirodnykh vod, Ch. 1, Is. I–II, Leningrad, ONTI KHIMTEORET publ., 1936. (In Russ.)
2. *Vlasov G. M.* Flyuidnoye “dykhaniye” zemli i stratiformnoye orudneniye [Fluid “breathing” of the earth and stratiform mineralization], Tikhookeanskaya geologiya, 1986, No. 5. (In Russ.)
3. *Kol'skaya sverkhglubokaya* : Issledovaniye glubinogo stroyeniya kontinental'noy kory s pomoshch'yu bureniya Kol'skoy sverkhglubokoy skvazhiny [Kola superdeep: Study of the deep structure of the continental crust by drilling the Kola superdeep well], ed. Ye. A. Kozlovskiy, Moscow, Nedra publ., 1984, 490 p. (In Russ.)
4. *Kraynov S. R., Ryzhenko B. N., Shvets V. M.* Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskiye, prirodnyye i ekologicheskiye aspekty [Geochemistry of underground waters. Theoretical, natural and environmental aspects]. ed. N. P. Laverov, Moscow, Nauka publ., 2004, 677 p. (In Russ.)
5. *Kudryavtsev N. A.* Genezis nefiti i gaza [Genesis of oil and gas], Leningrad, Nedra publ., 1973, 216 p. (In Russ.)
6. *Kuz'menko P. S., Chmerev V. S., Mikheyeva Ye. D.* Usloviya formirovaniya i zakonmernosti razmeshcheniya litiyenosnykh rassolov na territorii RF [Conditions of formation and patterns of placement of lithium-bearing brines on the territory of the Russian Federation], Razvedka i okhrana neдр [Exploration and protection of subsoil], 2023, No. 7, pp. 33–46. (In Russ.)
7. *Osnovnyye problemy solenakopleniya* : Sbornik [The main problems of salt accumulation: Collection]. ed. A. L. Yanshin, M. A. Zharkov; AN SSSR. Sib. otdniye. In-t geologii i geofiziki, Novosibirsk, Nauka publ., 1977, 317 p. (In Russ.)
8. *Pinneker Ye. V.* Rassoly Angaro-Lenskogo artezianskogo basseyna : (zakonomernosti razmeshcheniya, sostav, dinamika, formirovaniye i ispol'zovaniye) [Brines of the Angara-Lena artesian basin: (patterns of distribution, composition, dynamics, formation and use)]. AN SSSR SO Institut zemnoy kory, Moscow, Nauka publ., 1966, 322 p. (In Russ.)
9. *Vladimirov A. G.* [et al.] Geokhimicheskiye tendentsii kontsentrirvaniya litiya v Zemnoy kore i na yeye dnevnoy poverkhnosti [Geochemical trends in lithium

concentration in the Earth's crust and on its surface], available at: [http://shakhov.igm.nsc.ru/pdf/Shakhov120-p129\\_134.pdf](http://shakhov.igm.nsc.ru/pdf/Shakhov120-p129_134.pdf) (04.03.2024). (In Russ.)

10. *Mineraloobrazuyushchiye sistemy mestorozhdeniy vysokotekhnologichnykh metallov: dostizheniya i perspektivy issledovaniy. Vserossiyskaya konferentsiya, provodimaya v ramkakh meropriyatiy, posvyashchennykh 300-letiyu RAN. Moskva, 29 noyabrya–1 dekabrya 2023 g. Materialy konferentsii* [Mineral-forming systems of deposits high-tech metals: achievements and research prospects. All-Russian conference held as part of the events, dedicated to the 300<sup>th</sup> anniversary of the Russian Academy of Sciences. Moscow, November 29–December 1, 2023 Conference materials], available at: [http://www.igem.ru/300\\_ras/files/abstracts.pdf](http://www.igem.ru/300_ras/files/abstracts.pdf). (07.03.2024)
11. *Munk L. A., Hynek S. A., Bradley D. C., Boutt D., Labay K., Jochens H.* Lithium Brines: A Global Perspective, Reviews in Economic Geology, 2016, V. 18, pp. 339–365.
12. *Xiaocan Yu, Chunlian Wang, Hua Huang, Jiuyi Wang.* Kai Yan Lithium and brine geochemistry in the Qianjiang Formation of the Jiangnan Basin, central China. available at: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-31421-1>. (04.03.2024)

Статья поступила в редакцию 16.02.24; одобрена после рецензирования 05.03.24; принята к публикации 05.03.24.  
The article was submitted 16.02.24; approved after reviewing 05.03.24; accepted for publication 05.03.24.

По всем вопросам, связанными со статьями, следует обращаться в редакцию  
по тел. +7 (495)315-43-65 доб. 227  
E-mail: [ogeo@tsnigri.ru](mailto:ogeo@tsnigri.ru)

Адрес редакции: 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1