



## ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА, МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО И ГЕОМЕТРИЯ НЕДР

Краткое сообщение

УДК 551.1/.4

EDN: CCJLMJ

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-1-90-99



### Особенности концентрирования редких металлов на месторождении кальдерного типа в миоцен-четвертичной бор-литиеносной провинции Северной Америки, поиск аналогов

Д.А. Погребная<sup>a✉</sup>, А.Г. Вахромеев<sup>b</sup>

<sup>a,b</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>a</sup>ООО «Энерджи Крафт», г. Москва, Россия

<sup>b</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме.** В настоящее время повышенный интерес к добыче лития обуславливает его применение в широком спектре областей, в том числе для производства литий-ионных аккумуляторов. Наиболее распространенными типами сырьевых источников лития являются подземные рассолы, соленые озера («салары») и рудные минералы. В 2021 году было открыто первое и уникальное месторождение литиевых глин в кальдере Макдермитт (Невада, США), ресурсы которого оцениваются в 13,7 млн т карбоната лития с концентрацией лития 2231 мг/л. Уникальность данного месторождения обуславливает повышенный интерес к формированию модельных представлений о генезисе литиевых глин с целью поиска и разведки месторождений-аналогов. Цель данного исследования заключалась в представлении результатов обзора геологического строения и описания основных периодов развития кальдеры Макдермитт. Также авторами описаны потенциальные источники лития (магматические породы кислого состава и гидротермальные флюиды), пути миграции литиеносных рассолов и механизм формирования глин с повышенным содержанием лития (гекторит, иллит и смектит). Предложена обобщенная модель формирования данного типа месторождений. Особое внимание уделено роли гидротермальных флюидов как потенциальному дополнительному источнику «поставки» лития в бассейн кальдеры. Для разведки и выделения месторождений-аналогов сформированы ключевые критерии, характеризующие промышленные скопления лития этого типа. В заключение выдвинуты предположения о наличии месторождений-аналогов для месторождения Такер-Пасс в кальдере Макдермитт на территории литиевой провинции на плато Альтиплано-Пуна в одной из кальдер одноименного вулканического комплекса и на Восточной Камчатке.

**Ключевые слова:** литиевые глины, промышленные рассолы, салары, кальдера, литиевые месторождения, гекториты

**Для цитирования:** Погребная Д.А., Вахромеев А.Г. Особенности концентрирования редких металлов на месторождении кальдерного типа в миоцен-четвертичной бор-литиеносной провинции Северной Америки, поиск аналогов // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 1. С. 90–99. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-90-99>. EDN: CCJLMJ.

## APPLIED MINING AND PETROLEUM FIELD GEOLOGY, GEOPHYSICS, MINE SURVEYING AND SUBSOIL GEOMETRY

Brief report

### Rare metal concentration features at a caldera type deposit in the Miocene-Quaternary boron-lithium province of North America. Search for analogues

Daria A. Pogrebnaia<sup>a✉</sup>, Andrey G. Vakhromeev<sup>b</sup>

<sup>a,b</sup>Institute of the Earth Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>a</sup>LLC Energy Craft, Moscow, Russia

<sup>b</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

© Погребная Д.А., Вахромеев А.Г., 2024



**Abstract.** The fact that lithium has a wide range of applications in many fields including the production of lithium-ion batteries determines an increased interest in lithium mining. The most common types of lithium raw material sources are underground brines, saline lakes (“salars”), and ore minerals. In 2021, the first and unique deposit of lithium clays was discovered in the McDermitt caldera (Nevada, USA). Its resources are estimated at 13.7 million tons of lithium carbonate with the lithium concentration of 2231 mg/l. The uniqueness of this deposit raises the interest in the formation of model ideas about lithium clay genesis to search for analogous deposits and explore them. The purpose of the article is to provide an overview of the geological structure and describe the main development periods of the McDermitt caldera. The authors also characterize the potential sources of lithium (felsic igneous rocks and hydrothermal fluids), migration paths of lithium-bearing brines as well as the formation mechanism of clays with a high lithium content (hectorite, illite and smectite). A generalized formation model of this type of deposits is proposed. Particular attention is paid to the role of hydrothermal fluids as a potential additional source of lithium “supply” to the caldera basin. Key criteria characteristic of industrial accumulations of lithium of this type have been formed in order to explore and identify analogous deposits. In conclusion, the authors put forward a hypothesis about the presence of deposits that are analogous to the Thacker Pass in the McDermitt caldera in the lithium province on the Altiplano-Puna plateau in one of the calderas of the Altiplano-Puna volcanic complex, and in Eastern Kamchatka.

**Keywords:** lithium clays, industrial brines, salars, caldera, lithium deposits, hectorites

**For citation:** Pogrebnaia D.A., Vakhromeev A.G. Rare metal concentration features at a caldera type deposit in the Miocene-Quaternary boron-lithium province of North America. Search for analogues. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2024;47(1):90-99. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-90-99>. EDN: CCJLMJ.

## Введение

План устойчивого развития предполагает ежегодное увеличение использования возобновляемой энергии. Литий является стратегически важным элементом для обеспечения движения по пути «зеленой энергетики». Широкое применение литий-ионных аккумуляторов для производства электрического транспорта предъявляет высокие требования к качеству и обеспечивает растущий спрос на данный ресурс. Следовательно, пристальное внимание к добыче лития обуславливает повышенный интерес к его поиску и разведке.

Понимание геолого-генетической модели формирования литиевых месторождений разных минерагенических типов является ключевым шагом для поиска и выделения потенциальных зон поиска. Мировые запасы лития условно подразделяют [1] на несколько основных минеральных типов: в твердом сырье это литиеносные (сподуменовые) и комплексные (литий, бериллий, ниобий, тантал, олово) пегматиты; редкометалльные апогранитные метасоматиты (оловоносные циннвальдитовые грейзены, бериллиеносные олигоклаз-флогопитовые грейзены, слюдисто-флюоритовые метасоматиты) в комплексных месторождениях (бериллий, ниобий, тантал, олово, флюорит) с попутной литиевой минерализацией (лепидолит, циннвальдит, поллуцит, полилититонит, литиевый мусковит, амблигонит и др. Известно более 150 минералов); особо выделяют литиевые глины (смектит, мусковит, гекторит и др.) и гидроминеральное сырье – континентальные рассолы [1–4].

К промышленным континентальным рассолам относят рапу соляных озер (поверхностные рассолы), так называемых саларов, и рассолы глубоких горизонтов на платформах и щитах. Платформенные рассолы могут быть связаны с нефтяными месторождениями или представлены самостоятельными залежами [4, 5]. Особый интерес представляют именно рассолы, приуроченные к соляным озерам («саларам»), из-за высоких концентраций лития и более низкой себестоимости добычи в сравнении с пегматитами и рассолами на платформах и щитах.

Лидером по запасам литиевых континентальных рассолов является Южная Америка с суммарными запасами около 47 млн т лития в трех странах: Боливии, Аргентине и Чили [2, 6]. За пределами Южной Америки литий из поверхностных рассолов соляных озер добывается в Соединенных Штатах Америки, где его запасы составляют 0,3 млн т, и в Китае, где они равняются 4,6 млн т лития. Содержание оксида лития в коренных месторождениях – 1,3–3 %, в рассолах – 0,01–0,5 % [2].

В последние годы разведка месторождений поверхностных рассолов расширила границы после обнаружения больших ресурсов с высокими концентрациями лития в глинах в окрестности соляных озер. Наибольший интерес из глинистых минералов представляет гекторит, так как имеет максимальные содержания лития (0,16–0,74 %). Гекторит получил свое название по месторождению в Гекторе (Калифорния), где бассейновые отложения подвержены воздействию гидротермальных флюидов, которые циркулируют вдоль зоны разлома [7]. Крупнейшим месторождением литиевых глин



является Кингс-Вэлли (новое название – Такер-Пасс) в кальдере Макдермитт (Невада, США) с оцененными ресурсами 13,7 млн т карбоната лития с концентрацией лития 2231 мг/л. На территории Южной Америки гекторит был обнаружен только в области крупнейшего соляного озера Салар-де-Атакама с помощью спектрального картирования ASTER (англ.: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), других проявлений гекторитов пока не выявлено.

В работе [3] были определены пять крупнейших бор-литиеносных провинций, которые расположены на Анатолийском полуострове (B1), в центральных областях западных окраин Южной и Северной Америки, в Южном и Северном Тибете. Общей характеристикой этих провинций является то, что они представляют собой рудоносные лимнические отложения и/или концентрированные рассолы бессточных озер аридных впадин. Данные провинции находятся в регионах, геодинамически активных в кайнозое и в течение последних 25 млн лет [3].

Для выделения новых потенциальных областей, благоприятных для формирования

месторождений литиевых глин на территории бор-литиеносных миоцен-четвертичных провинций, и понимания особенностей их осадконакопления был выполнен анализ геологического строения месторождения Такер-Пасс в кальдере Макдермитт в штате Невада (США).

### Материалы и методы исследования

Кальдера Макдермитт (месторождение Такер-Пасс) расположено в зоне невадийского орогена в области субдукции второго типа плиты Хуан де Фука под Северо-Американской плитой [8]. Невадийский орогенез произошел вдоль западной окраины Северной Америки в период между средней юрой и ранним меловым периодом (примерно от 155 до 145 млн лет назад). Согласно классификации Т.В. Романюк и А.В. Ткачева, он располагается в бор-литиеносной провинции B3 (рис. 1) в активной трансформационной зоне: Калифорнийской сдвиговой зоне в пустыне Мохаве и линии Уолкер-Лэйн, маркирующей границу между задуговой областью и реликтом вулканической дуги мезозойского времени [3].

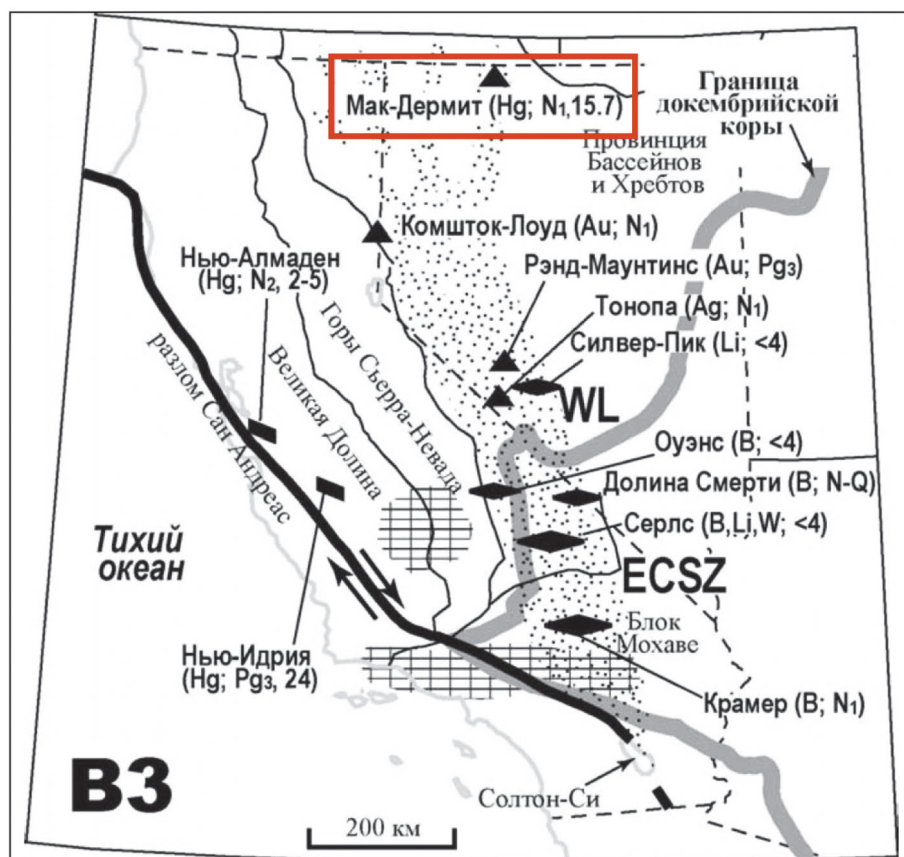


Рис. 1. Главные географические и тектонические элементы западной окраины Северной Америки. Кальдера Макдермитт выделена красным прямоугольником [3]

Fig. 1. Major geographic and tectonic elements of the western margin of North America. Red triangle indicates McDermitt Caldera [3]



Кальдера Макдермитт размером 40×30 км месторождения Такер-Пасс была сформирована под действием перемещения Йеллоустоунской горячей точки. Данная кальдера образовалась во время извержения около 1000 км<sup>3</sup> туфа возрастом 16,39±0,02 млн лет, который имеет четкую зональность от ультращелочных риолитов с высоким содержанием диоксида кремния до метаглиноземистых трахидацитов [9], в области, подвергшейся двум небольшим эпизодам эоценового вулканизма 47 и 39 млн лет назад, а также крупному среднемиоценовому вулканизму, который привел к расширению кальдеры. Отложения, приуроченные к кальдере, разделяются на несколько областей: внутрикальдерная зона и зона закальдерного пространства. В зоне кальдеры Макдермитт есть доказанные проявления полезных ископаемых: ртути, урана, лития, золота и циркония [9, 7]. Концентрирование полезных ископаемых связано с магматической деятельностью и наличием депрессионной структуры.

Наибольший интерес с точки зрения формирования, обогащения и сохранения литиевых толщ имеют внутрикальдерные отложения (рис. 2, оранжевый цвет). Эта формация представляет собой первично туфогенные осадочные отложения, образовавшиеся в озерном бассейне кальдеры. В основном они обнажаются в центральной части кальдеры и перекрывают отложения внутрикальдерного туфа (Tmt), в том числе поздние исландиты и риолиты Макдермитт Крик.

Разрез месторождения литиевых глин Такер-Пасс в кальдере Макдермитт представлен четвертичными отложениями (Qfy). Внутрикальдерные осадочные отложения (Tis) составляют неоднородную толщу преимущественно слабо обнаженных, слабо литифицированных вулканогенно-осадочных отложений, образованную в озерных условиях внутри кальдеры. Данная пачка представлена слоистыми отложениями туфо-песчаников, алевролитов, аргиллитов, тефры с линзами конгломератов и известняков. Туфогенные отложения в основном замещены на смектит, цеолит, калиевый полевой шпат и местами окремнены до опала и халцедона. Мощность – 190 м. Tmt представлен афировым риолитом (77 % диоксида кремния) щелочного состава. Афировые риолиты (Tar) (72–75 % диоксида кремния) характеризуют периоды докальдерной активности. Мощность отложений – от 10 до 200 м [7, 9, 10].

Глинистые отложения (отложения Tis), обогащенные литием, представлены гекторитами, иллитами и смектитами, которые перекрывают четвертичными отложениями в южной части [7, 10].

Осадконакопление смектитов в палеоозере Макдермитт началось из-за взаимодействия обломков вулканического стекла с водными растворами в замкнутом бассейне кальдеры, где подстилающие туфы имели кислый и ультращелочной состав. Озерная обстановка характеризуется наличием карбонатов и кальцитовых конкреций, образованных в одно время со смектитом. В данных условиях сформировался магниевый смектит, подобный гекториту [Na<sub>0,3</sub>(Mg,Li)<sub>3</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>] [10], так как озерный рассол содержал повышенные значения Li<sup>+</sup>, Rb<sup>+</sup>, F<sup>-</sup> и других растворенных веществ из-за выщелачивания данных элементов из ультращелочных риолитов. Палеоозеро служило водосборным бассейном для рудоносных флюидов и дальнейшего формирования глинистых отложений после множества циклов выпаривания в замкнутом бассейне.

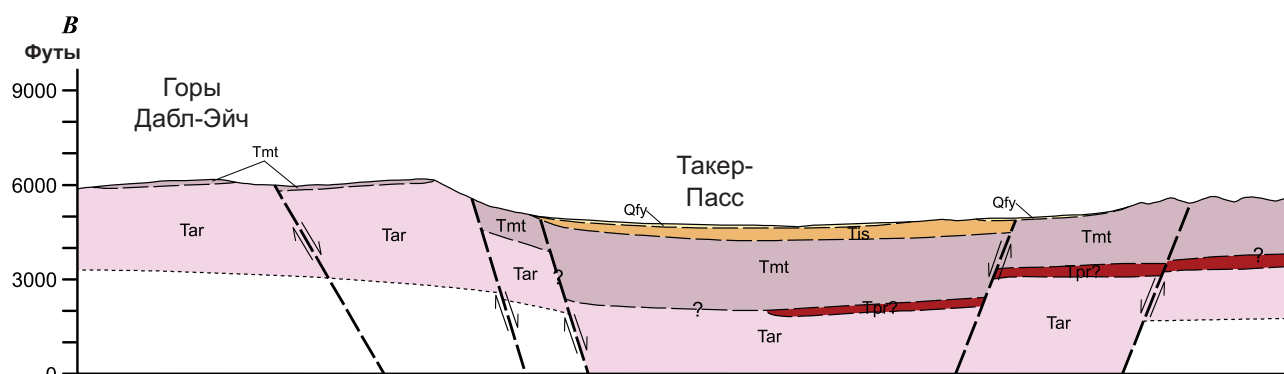


Рис. 2. Геологический разрез месторождения Такер-Пасс (по источнику [9] в переводе авторов)  
Fig. 2. Geological section of the Thacker Pass deposit (according to the source [9] translated by the authors)



Литий сконцентрирован в глинистых минералах с равномерным распределением, концентрация лития росла по мере замещения первичного смектита иллитом. Точечное содержание лития в иллите составляет от 1,3 до 2,4 масс. %. По результатам анализов цельных пород из осадочных интервалов, в которых преобладает смектитовая глина по всему диапазону кальдеры, содержание лития в среднем составляет от 1000 до 4000 ppm лития<sup>1</sup> [6], тогда как в интервалах иллита, присутствующих только на перевале Такер, концентрации лития варьируются от 4000 до 8000 ppm с максимальным измеренным содержанием лития ~9000 ppm [11, 12].

Исходя из концептуальной модели формирования литиевых месторождений кальдерного типа, предложенной Т. Бенсоном с соавторами [6] (рис. 3), большой объем лав риолитового состава с умеренными содержаниями лития являлся основным источником для «выщелачивания и транспортировки лития» в закрытый бассейн [11]. Дополнительными источниками лития являются окогенетические пост-кальдерные события – вторичные извержения и активная деятельность гидротермальных флюидов, циркулирующих вдоль систем разломов [13]. Туфогенные отложения подвергаются изменениям и образуют литиеносные глины – гекториты, смектиты и иллиты. Большой объем продуктов извержения и их высокая пористость усиливают скорость процессов выветривания, миграции лития,

обогащения глинистых взвесей и осадконакопления в замкнутой системе. Несмотря на то, что эта модель основана на наблюдениях в кальдере Макдермитт, большинство характеристик типичны для миоценовых кальдер во внутриконтинентальных условиях [2], которые сохраняют активную деятельность гидротермальной системы, поэтому могут содержать огромные ресурсы литиевой глины, подобно месторождению Такер-Пасс. Поиск вулканогенно-осадочных месторождений литиевых глин не ограничивается Северной Америкой, так как области молодого вулканизма и крупнейшие мировые бор-литиевые провинции известны на территории Южной Америки (например, в Чили и Аргентине), на Анатолийском полуострове, в Южном и Северном Тибете [3].

Потенциальными областями для поиска такого типа месторождений являются гидродинамически активные пояса миоцен-четвертичного возраста [3]. Именно области присутствия молодого вулканизма считаются индикаторами активной деятельности гидротермальных процессов. Кальдеры являются наиболее благоприятной обстановкой для поиска литиевых глин благодаря наличию периодов коллапса и возрождения купола, в отличие от классических бассейнов межгорных впадин. После коллапса вулкана и образования кальдеры пространство депрессии заполняется поверхностным стоком и подземными водами из геотермальных источников, образуя вулка-

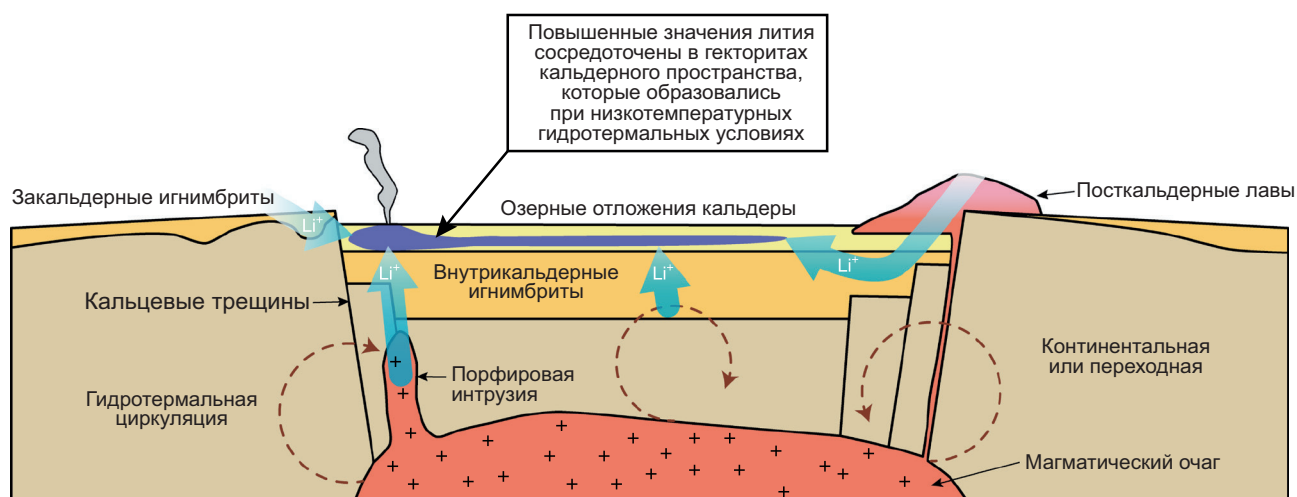


Рис. 3. Модель обогащения литием бассейна кальдеры Макдермитт (по источнику [11] в переводе авторов)

Fig. 3. Model of McDermit caldera basin lithium enrichment (according to the source [11] translated by the authors)

<sup>1</sup> Голева Г.А. Гейзеры и горячие озера Кроноцкого заповедника (Камчатка): путеводитель. М: Прогресс-Академия, 1993. 59 с.



ническое озеро на поверхности изверженных пород (игнимбритов/туфов). Под действием гидротермальных процессов происходит метасоматоз. Клиноптилолит, содержащийся в игнимбритах, претерпевает изменения и превращается в глинистые отложения и далее в гекторит. Гекторитовая пачка, образованная на дне вулканического озера, является абсорбентом лития и приобретает концентрацию лития от 0,16 до 0,74 %. Действие постмагматических процессов продолжается, и из-за изменения давлений и объема магматического резервуара происходит воздымание кальедерного пространства (возрождение).

По мнению авторов, главными факторами для поиска литиевых месторождений данного типа являются:

- молодой вулканизм (кайнозойского возраста, ультращелочного состава);
- большой объем кислого вулканизма;
- активное действие гидротермальных процессов;
- наличие последовательных событий коллапса и возрождения кальедеры.

Исходя из данных характеристик был найден пример аналогичной обстановки потенциального месторождения литиевых глин на территории миоцен-четвертичной провинции В2 на плато Альтиплано-Пуна. На территории Аргентины не было сообщения о нахождении гекторита. Кальедера Лагуна де Вилама (рис. 4) расположена на территории вулканического комплекса Альтиплано-Пуна. Данный объект является потенциальным местом для поиска гекторита по нескольким причинам:

- область кальедеры сложена продуктами кислого щелочного вулканизма (дацитового состава);
- согласно топографическому профилю, можно предполагать, что область кальедеры была заполнена вулканическим озером, после произошел этап возрождения, восточная часть кальедеры претерпела воздымание и донные озерные отложения обнажились на поверхности;
- в непосредственной близости есть касситеритовое месторождение с доказанным гидротермальным генезисом;
- в минералогической базе данных имеется информация о нахождении вблизи кальедеры минералов группы мусковита (прародителя гекторита) и каолинита;
- в области кальедеры присутствует аридный климат и имеются соляные озера.



**Рис. 4. Озеро в кальедере Лагуна де Вилама**  
Снимок Д.А. Погребной из полевого выезда, июнь 2023 г.

**Fig. 4. Lake in the Laguna de Vilama caldera**  
D.A. Pogrebnaia's image from the field trip, June 2023

Не менее интересны объекты-аналоги в областях молодого вулканизма нашей страны. Один из таких объектов известен в вулканогенно-активной зоне Камчатки. Это Узонско-Гейзерная вулканотектоническая депрессия<sup>1</sup> [14], в которой выделены и изучены Узонская и Гейзерная кальедеры. Здесь расположена самая крупная гидротермальная система Камчатки. По А.В. Кирюхину [15], Йеллоустонская (США) и Узонско-Гейзерная (Камчатка, Россия) депрессии являются примерами-индикаторами перераспределения разгрузки магмы и углекислого газа. Не вдаваясь в детали описания этого крупнейшего по масштабам Камчатки объекта, кратко отметим его особенности разнотипного гидротермального минералообразования, тесно связанного с геохимией термальных вод.

Отмечено, что породы прибрежных зон термальных озер в котловинах кальедер изменены под воздействием термальных вод и газов в пестроцветные глины, изучена вертикальная минерало-геохимическая зональность и процессы рудообразования за счет процессов сернокислотного выщелачивания изверженных пород и воздействия высокотемпературных щелочных гидротерм.

По Г.А. Голевой<sup>1</sup>, основными типами термальных вод в Узонско-Гейзерном районе являются:

- сернисто-углекислые парогидротермы фумарольного типа;
- азотно-углекислые парогидротермы гейзерного типа;
- углекислые субтермальные (до 80 °С) воды.



В аспекте переноса редких металлов и в первую очередь лития интересен второй тип глубоких гидротерм, который формируется на большом удалении от активных вулканических структур, имеет на глубине околонейтральную реакцию, а в открытых очагах разгрузки – щелочную. В солевом составе термальных вод преобладают хлориды натрия, в газовом – углекислый газ и азот. Важнейшее отличие терм этого типа – концентрирование редких щелочных металлов: лития, рубидия, цезия, молибдена, вольфрама, германия, а также марганца. Наиболее повышенные их количества обнаружены в тонкодисперсных глинистых минералах группы цеолитов, а также пористых вулканических стеклах за счет воздействия высокотемпературных гидротерм<sup>1</sup>.

Основным гидрогеохимическим барьером, осадителем редких щелочных элементов из термальных щелочных хлоридных вод, является сорбционно-силикатный. Он образуется при резком падении растворимости и осаждении кремнекислоты при понижении температуры в очагах разгрузки этого типа гидротерм – перегретых хлоридных вод. С ней соосаждается большая часть присутствующих в термальных водах компонентов редкощелочной группы (литий, рубидий, цезий, бериллий, вольфрам, германий и др.). Группа опалов является натечной коллоидальной формой нахождения кремнекислоты и формирует слоистые постройки гейзеритов в зонах разгрузки парогидротерм. Такие отложения детально изучены также в Северо-Мутновской вулканической зоне<sup>1</sup> [14, 15].

Авторами были выполнены полевые выезды в июне 2023 года на плато Альтиплано-Пуна, а в сентябре 2023 года – на гидротермальные

системы и термальные поля Камчатки. Произведен отбор геологического материала (рассола, глин и вулканической породы) на территории озера Лагуна Вилама. Первичные результаты поверхностных проб рассола показывают содержания лития 48,5 мг/л и плотность воды 1,06 г/см<sup>3</sup>. Такие результаты свидетельствуют о повышенных содержаниях лития в области кальдеры. В дальнейшем планируется провести более обширные исследования по всей территории кальдеры с целью определения локализации литиевых глин. На плато Альтиплано-Пуна расположено большое количество кальдер, зона современного вулканизма является индикатором действия гидротермальных процессов. Выполнен отбор образцов риолитов, игнимбритов, опалов, вулканического стекла в Северо-Мутновской вулканической области Восточной вулканогенной зоны Камчатки.

### Заключение

Новое в геологии, в процессах концентрирования редких металлов, в первую очередь лития, в толщах глин вулканотектонической депрессии Йеллоустонской гидротермальной системы, кальдеры Макдермитт – это веское основание вернуться к изучению объектов-аналогов на территории Южной Америки, Центральной и Северо-Восточной Азии. В России – древних гидротермальных систем Сибирской платформы [4, 5, 16] и молодых гидротермальных систем вулканогенно-активной зоны Камчатки<sup>1</sup> [15, 17]. Поиск, разведка, исследование и картирование месторождений-аналогов открывает потенциал к расширению ресурсной базы и введению в эксплуатацию нового типа редкометалльных месторождений – литиевых глин.

### Список источников

1. Боярко Г.Ю., Хатьков В.Ю., Ткачева Е.В. Сырьевой потенциал лития России // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 12. С. 7–16. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3975>. EDN: HORMRU.
2. Kesler S.E., Gruber P.W., Medina P.A., Keoleian G.A., Everson M.P., Wallington T.J. Global lithium resources: relative importance of pegmatite, brine and other deposits // Ore Geology Reviews. 2012. Vol. 48. P. 55–69. <https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2012.05.006>.
3. Романюк Т.В., Ткачев А.В. Геодинамический сценарий формирования крупнейших мировых неоген-четвертичных бор-литиеносных провинций. М.: Светоч Плюс, 2010. 304 с.
4. Вахромеев А.Г., Литвинова И.В., Мисюркеева Н.В., Алексеев С.В., Погребная Д.А. К минерогенезу лития гидроминеральной провинции Сибирской платформы // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): материалы науч. конф. (г. Иркутск, 18–21 октября 2022 г.). Иркутск, 2022. Т. 20. С. 43–45. EDN: ОЕСОКО.
5. Вахромеев А.Г., Зелинская Е.В., Литвинова И.В., Погребная Д.А. Модель вторичного концентрирования литиеносных рассолов в кипящих флюидных системах магматогенно-осадочных бассейнов гидроминеральной провинции Сибирской платформы // Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа (Geothermal Volcanology Workshop 2023): материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием (г. Петропавловск-Камчатский, 4–9 сентября 2023 г.). Петропавловск-Камчатский, 2023. С. 11–12.



6. Tabelin C.B., Dallas J.A., Casanova S., Pelech T., Bournival G., Saydam S., et al. Towards a low-carbon society: a review of lithium resource availability, challenges and innovations in mining, extraction and recycling, and future perspectives // *Minerals Engineering*. 2021. Vol. 163. P. 106743. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106743>.

7. Castor S.B., Henry C.D. Lithium-rich claystone in the McDermitt Caldera, Nevada, USA: geologic, mineralogical, and geochemical characteristics and possible origin // *Minerals*. 2020. Vol. 10. Iss. 1. P. 68. <https://doi.org/10.3390/min10010068>.

8. DiPietro J.A. *Geology and landscape evolution. General principles applied to the United States*. Elsevier, 2018. 580 p.

9. Henry C.D., Castor S.B., Starkel W., Ellis B.S., Wolff J.A., Laravie J.A., et al. Geology and evolution of the McDermitt caldera, northern Nevada and southeastern Oregon, western USA // *Geosphere*. 2017. Vol. 13. Iss. 4. <https://doi.org/10.1130/GES01454.1>.

10. Benson T.R., Matthew A.C., Dilles J.H. Hydrothermal enrichment of lithium in intracaldera illite-bearing claystones // *Science Advances*. 2023. Vol. 9. Iss. 35. P. 1–10. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh8183>.

11. Benson T.R., Coble M.A., Rytuba J.J., Mahood G.A. Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins // *Nature Communications*. 2017. Vol. 8. P. 270. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00234-y>.

12. Ingrassia J.T., Ressel M.W., Benson T.R. Thacker Pass lithium clay deposit, McDermitt caldera, north-central Nevada: Devitrification of McDermitt Tuff as the main lithium source // *Geological Society of Nevada Special Publication*. 2020. P. 395–410.

13. Gallup D.L. Geochemistry of geothermal fluids and well scales, and potential for mineral recovery // *Ore Geology Reviews*. 1998. Vol. 12. Iss. 4. P. 225–236. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(98\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(98)00004-3).

14. Топчиева О.М., Петровский В.А., Сухарев А.Е. Условия образования минеральных включений в гидротермальных метасоматитах г. Двугорбой, Южная Камчатка // *Вестник Пермского университета. Геология*. 2018. Т. 17. № 1. С. 1–10. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.17.1.1>. EDN: LAUVYD.

15. Кирюхин А.В. Магматический фрактинг и гидротермальные системы под активными вулканами // *Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа (Geothermal Volcanology Workshop 2020): материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием (г. Петропавловск-Камчатский, 3–8 сентября 2020 г.)*. Петропавловск-Камчатский, 2020. С. 27–31. EDN: MWRRKH.

16. Леднева В.П., Лурье М.Л. Некоторые особенности триасового магматизма Тунгусской синеклизы // *Проблемы вулканогенно-осадочного литогенеза: сб. статей / под ред. Г.С. Дзюценидзе, И.В. Соколова, И.В. Хворовой*. М.: Наука, 1974. С. 47–51.

17. Рычагов С.Н. Гигантские газо-гидротермальные системы и их роль в формировании пародоминирующих геотермальных месторождений и рудной минерализации // *Вулканология и сейсмология*. 2014. № 2. С. 3–28. <https://doi.org/10.7868/S0203030614020060>. EDN: SAIXYV.

## References

1. Boyarko G.Yu., Khatkov V.Yu., Tkacheva E.V. Lithium raw potential in Russia. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursoy = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. GeoAssets Engineering*. 2022;333(12):7-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3975>. EDN: HORMRU.

2. Kesler S.E., Gruber P.W., Medina P.A., Keoleian G.A., Everson M.P., Wallington T.J. Global lithium re-sources: relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews*. 2012;48:55-69. <https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2012.05.006>.

3. Romanyuk T.V., Tkachev A.V. *Geodynamic formation scenario of the world's largest Neogene-Quaternary boron-lithium provinces*. Moscow: Svetoch Plyus; 2010, 304 p. (In Russ.).

4. Vakhromeev A.G., Litvinova I.V., Misyurkeeva N.V., Alekseev S.V., Pogrebnaia D.A. On lithium minerageny of the Siberian Platform hydromineral province. In: *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): materialy nauch. konf. = Geodynamic evolution of the Central Asian mobile belt lithosphere (from ocean to continent): proceedings of the scientific conference*. 18–21 October 2022, Irkutsk. Irkutsk; 2022, vol. 20, p. 43-45. (In Russ.). EDN: OECOKO.

5. Vakhromeev A.G., Zelinskaya E.V., Litvinova I.V., Pogrebnaia D.A. Model of lithium-bearing brine secondary concentration in the boiling fluid systems of magmatic-sedimentary basins of the Siberian platform hydromineral province. In: *Geotermal'naya vulkanologiya, gidrogeologiya, geologiya nefi i gaza (Geothermal Volcanology Workshop 2023): materialy Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem = Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil & Gas Geology (Geothermal Volcanology Workshop 2023): proceedings of the All-Russian scientific conference with the international participation*. 4–9 September 2023, Petropavlovsk-Kamchatsky. Petropavlovsk-Kamchatsky; 2023, p. 11-12. (In Russ.).

6. Tabelin C.B., Dallas J.A., Casanova S., Pelech T., Bournival G., Saydam S., et al. Towards a low-carbon society: a review of lithium resource availability, challenges and innovations in mining, extraction and recycling, and future perspectives. *Minerals Engineering*. 2021;163:106743. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106743>.

7. Castor S.B., Henry C.D. Lithium-rich claystone in the McDermitt Caldera, Nevada, USA: geologic, mineralogical, and geochemical characteristics and possible origin. *Minerals*. 2020;10(1):68. <https://doi.org/10.3390/min10010068>.

8. DiPietro J.A. *Geology and landscape evolution. General principles applied to the United States*. Elsevier; 2018, 580 p.

9. Henry C.D., Castor S.B., Starkel W., Ellis B.S., Wolff J.A., Laravie J.A., et al. Geology and evolution of the McDermitt caldera, northern Nevada and southeastern Oregon, western USA. *Geosphere*. 2017;13(4). <https://doi.org/10.1130/GES01454.1>.

10. Benson T.R., Matthew A.C., Dilles J.H. Hydrothermal enrichment of lithium in intracaldera illite-bearing claystones. *Science Advances*. 2023;9(35):1-10. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh8183>.





11. Benson T.R., Coble M.A., Rytuba J.J., Mahood G.A. Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins. *Nature Communications*. 2017;8:270. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00234-y>.
12. Ingrassia J.T., Ressel M.W., Benson T.R. Thacker Pass lithium clay deposit, McDermitt caldera, north-central Nevada: devitrification of McDermitt tuff as the main lithium source. *Geological Society of Nevada Special Publication*. 2020;395-410.
13. Gallup D.L. Geochemistry of geothermal fluids and well scales, and potential for mineral recovery. *Ore Geology Reviews*. 1998;12(4):225-236. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(98\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(98)00004-3).
14. Topchieva O.M., Petrovsky V.A., Sukharev A.E. The conditions for the formation of mineral inclusions in hydrothermal metasomatites of the Dvugorbaya mountain, Southern Kamchatka. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya = Bulletin of Perm University. Geology*. 2018;17(1):1-10. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/psu.geol.17.1.1>. EDN: LAUVYD.
15. Kiryukhin A.V. Magmatic fracking and hydrothermal systems beneath active volcanoes. In: *Geotermal'naya vulkanologiya, gidrogeologiya, geologiya nefti i gaza (Geothermal Volcanology Workshop 2020): materialy Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. Uchastiem = Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil&Gas Geology (Geothermal Volcanology Workshop 2020): materials of the All-Russian scientific conference with international participation*. 3–8 September 2020, Petropavlovsk-Kamchatsky. Petropavlovsk-Kamchatsky; 2020, p. 27-31. (In Russ.). EDN: MWRRKH.
16. Ledneva V.P., Lurie M.L. Some features of Triassic magmatism of the Tunguska syncline. In: Dzotsenidze G.S., Sokolov I.V., Khvorova I.V. (eds). *Problemy vulkanogenno-osadochnogo litogeneza = Problems of volcanogenic-sedimentary lithogenesis*. Moscow: Nauka; 1974, p. 47-51. (In Russ.).
17. Rychagov S.N. Giant gas-rich hydrothermal systems and their role in the generation of vapor-dominated geothermal fields and ore mineralization. *Vulkanologiya i seismologiya = Volcanology and seismology*. 2014;2:3-8. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0203030614020060>. EDN: SAIXYV.

### Информация об авторах / Information about the authors



**Погребная Дарья Александровна**,  
аспирант,  
Институт земной коры СО РАН,  
г. Иркутск, Россия,  
руководитель международных проектов,  
ООО «Энерджи Крафт»,  
г. Москва, Россия,  
✉ [dapogrebnaia@energy-craft.com](mailto:dapogrebnaia@energy-craft.com)  
<https://orcid.org/0009-0008-6658-8923>

**Daria A. Pogrebnaia**,  
Postgraduate Student,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Irkutsk, Russia,  
Project Manager,  
LLC Energy Craft,  
Moscow, Russia,  
✉ [dapogrebnaia@energy-craft.com](mailto:dapogrebnaia@energy-craft.com)  
<https://orcid.org/0009-0008-6658-8923>



**Вахромеев Андрей Гелиевич**,  
доктор геолого-минералогических наук, профессор,  
заведующий лабораторией геологии нефти и газа,  
Институт земной коры СО РАН,  
г. Иркутск, Россия,  
профессор кафедры нефтегазового дела,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
[andrey\\_igp@mail.ru](mailto:andrey_igp@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-0712-6568>

**Andrey G. Vakhromeev**,  
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,  
Head of the Oil and Gas Laboratory,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Irkutsk, Russia,  
Professor of the Department of Oil and Gas Engineering,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
[andrey\\_igp@mail.ru](mailto:andrey_igp@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-0712-6568>



### Вклад авторов / Contribution of the authors

Д.А. Погребная – доработка концепции исследования, проведение экспериментов, обработка полученных данных, обсуждение результатов, написание текста статьи.

А.Г. Вахромеев – разработка концепции исследования, развитие методологии, обсуждение результатов, написание текста статьи.

Daria A. Pogrebnaia finalized the research concept, conducted the experiments, processed the data obtained, discussed the results and wrote the text of the article.

Andrey G. Vakhromeev developed the research concept, worked out the research methodology, discussed the results and wrote the text of the article.

### Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

### Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 26.01.2024; одобрена после рецензирования 16.02.2024; принята к публикации 26.02.2024.

The article was submitted 26.01.2024; approved after reviewing 16.02.2024; accepted for publication 26.02.2024.