

УДК 553.493.34.07(739.3)

Д. А. Погребная (ИЗК СО РАН, ООО «Энерджи Крафт»),
 А. Г. Вахромеев (ИЗК СО РАН, ИРНТУ), В. С. Ковалевский (МГУ)

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЛИТИЕНОСНЫХ ГЛИН КАЛЬДЕРНОГО ТИПА ТАКЕР ПАСС И ЕГО ВОЗМОЖНЫЕ АНАЛОГИ (НЕВАДА, СЕВЕРНАЯ АМЕРИКА)

Растущий спрос на литий вызван переходом к возобновляемым источникам энергии. В связи с этим актуальным является изучение новых месторождений и технологий добычи лития, чтобы обеспечить стабильное снабжение рынка и поддержать экологически устойчивое производство. В данной статье изучены пути миграции литиеносных рассолов и механизм формирования глин с повышенным содержанием лития: гекторита, иллита и смектита. Описана обобщенная модель формирования типа месторождений литиеносных глин кальдерного типа Такер Пасс в Северной Америке. Особое внимание уделено роли гидротермальных флюидов, как потенциально дополнительному источнику «поставки» лития в бассейн кальдеры. Составлены ключевые критерии, характеризующие промышленные скопления лития данного типа.

Ключевые слова: литиевые глины, промышленные рассолы, «салары», кальдера, литиевые месторождения, гекториты, США.

D. A. Pogrebnaya (IEC SB RAS, Energy Craft LLC),
 A. G. Vakhromeev (IEC SB RAS, INRTU), V. S. Kovalevsky (MSU)

GEOLOGICAL STRUCTURE OF CALDERA-TYPE LITHIUM-BEARING THACKER PASS TYPE CLAY DEPOSITS AND ITS POSSIBLE ANALOGUES (NEVADA, NORTH AMERICA)

The growing demand for lithium is driven by the transition to renewable energy sources. In this regard, it is relevant to study new deposits and technologies for lithium mining in order to ensure a stable supply to the market and support environmentally sustainable production. This article studies the migration paths of lithium-bearing brines and the mechanism of clays formation with a high lithium content: hectorite, illite, and smectite. A generalized model for the formation of the Tucker Pass caldera-type lithium-bearing clay deposits in North America is described. Particular attention is paid to the role of hydrothermal fluids as a potential additional source of lithium “supply” to the caldera basin. Key criteria characterizing commercial accumulations of lithium of this type are listed.

Keywords: lithium clays, commercial brines, “salars”, caldera, lithium deposits, hectorites, USA.

Для цитирования: Погребная Д. А., Вахромеев А. Г., Ковалевский В. С. Геологическое строение месторождения литиеносных глин кальдерного типа Такер Пасс и его возможные аналоги (Невада, Северная Америка) // Региональная геология и металлогения. – 2024. – № 98. – С. 90–100.

Введение. Литий является стратегически важным элементом в жизни человечества для обеспечения движения по пути «зеленой энергетики». Широкое применение литий-ионных аккумуляторов для производства электрического транспорта увеличивает потребность в увеличении общемировой добычи лития [14; 15].

Мировые запасы лития можно разделить на несколько основных сырьевых типов: континентальные рассолы, твердые литиевые минералы (сподумен, лепидолит, петалит, амблигонит и т. д.), встречающиеся в пегматитах, литиевые глины (смектит, мусковит, гекторит и др.) (рис. 1).

К промышленным континентальным рассолам относят рапу соляных озер (поверхностные рассолы), так называемых «саларов», и рассолы глубо-

ких горизонтов на платформах и щитах. Платформенные рассолы могут быть связаны с нефтяными месторождениями или быть представлены самостоятельными залежами. 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.

Уверенное лидирующее положение по добыче лития по отчету суммарных запасов USGS за 2023 г. занимает Чили с показателем в 9,3 млн т [20]. Приводится также статистика для других стран, где ресурсы лития были пересмотрены до 9,1 млн т за 2023 г. Аргентина в этом списке занимает третье место с показателем 3,6 млн т.

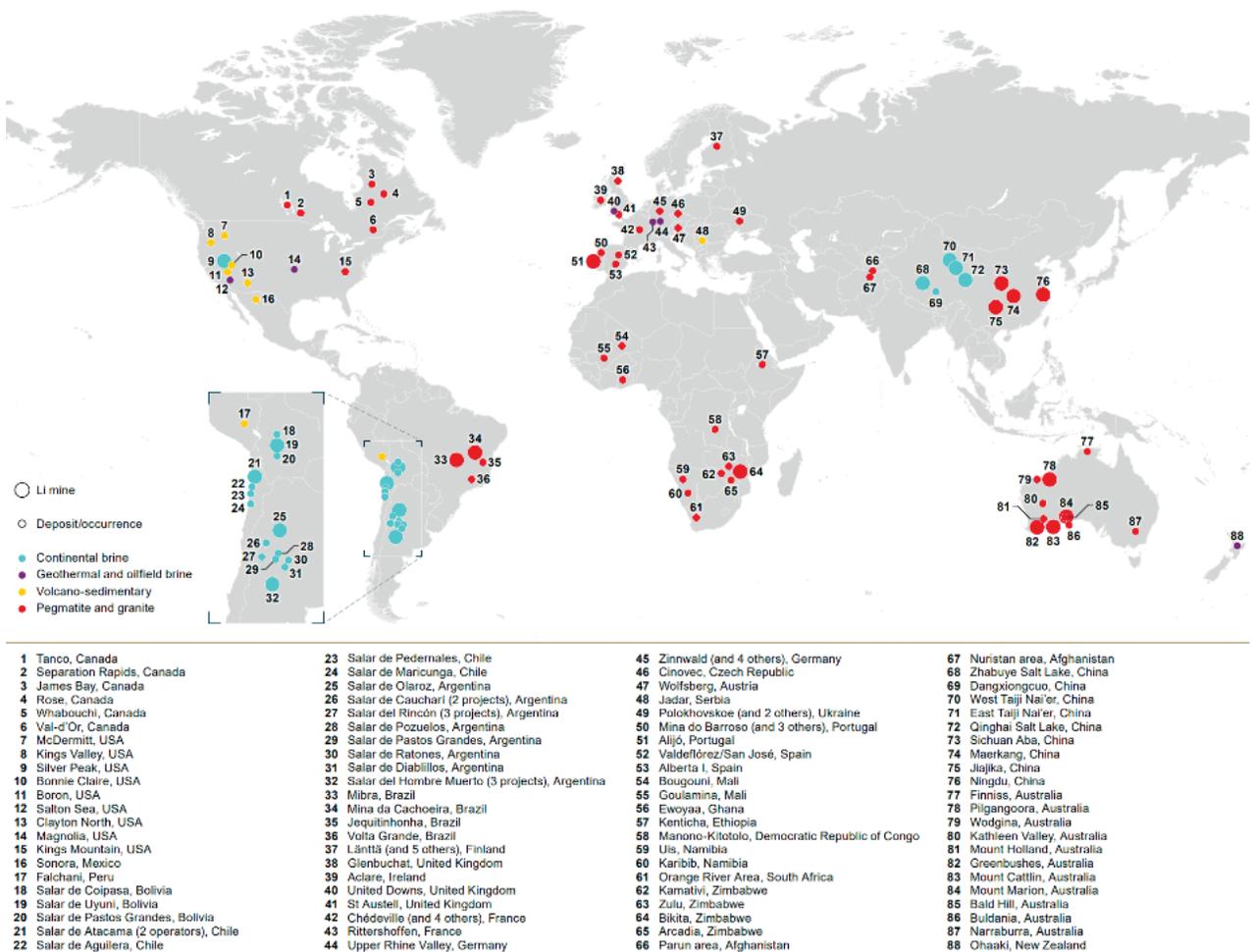


Рис. 1. Карта распространения литиевых месторождений в мире без данных по России (заимствованно из [21])

За пределами Южной Америки литий добывается в Австралии (6,2 млн т), Китае (3 млн т), США (1 млн т). На долю других стран приходится чуть больше 3 млн т. Основу подсчета составляют ресурсы лития из континентальных рассолов, геотермальных рассолов, нефтепромысловых рассолов и пород, содержащих литий (пегматиты и др.). Содержание лития в коренных месторождениях – 1,3–3,0%, в рассолах – 0,01–0,5%.

Обнаружение больших ресурсов лития в глинистых минералах в окрестностях соляных озер повысило интерес к изучению таких объектов. Литиевые месторождения «глинистого» типа распространены в основном на территории Мексики, Сербии, США, Китая и Внутренней Монголии [14]. Наибольший интерес из глинистых минералов представляет гекторит, так как имеет наибольшие содержания лития (0,16–0,74%). Гекторит получил свое название, так как впервые был обнаружен на месторождении в Гекторе, Калифорния [10]. Хемосорбция, миграция лития в гекторитовые глинистые отложения происходят за счет воздействия гидротермальных флюидов, движущихся по системе разломов. Также литий мигрирует за счет поверхностных вод, путем выщелачивания метеорными водами из риолитовых лав и вулканических пеплов («материнской породы»), которые скапливаются в локальных впадинах, образуя соляные озера – «салары». Следовательно, наличие в системе одного из элементов ее – «литиевые глины» или «литиевый рассол» является индикатором присутствия другого. Крупнейшим месторождением литиевых глин является Kings Valley (новое название Thacker Pass) в кальдере McDermitt, Nevada, USA с оцененными ресурсами 13,7 млн т карбоната лития с концентрацией лития 2231 ppm [17]. Само месторождение расположено над зоной циркулирующей гидротермальных флюидов, насыщенных литием. Основным каналом транспортировки и насыщения бассейновых отложений выступают разрывные нарушения. Особенностью месторождения является его приуроченность к вулканической постройке. В пределах Южной Америки нет известных месторождений литиевых глин, однако, по мнению авторов, существуют все предпосылки к их открытию.

Геологическая характеристика месторождения Thacker Pass. Региональная геология и геодинамическая позиция. Месторождение Thacker

Pass (ранее называвшееся Kings Valley) расположено в зоне Невадийского орогена в области субдукции II типа плиты Хуан де Фука под Северо-Американской плитой [11]. Невадийский орогенез происходил вдоль западной окраины Северной Америки в период от средней юры до раннего мела, который составляет примерно от 155 до 145 млн лет назад. На протяжении всего этого цикла орогенеза происходило по крайней мере два различных типа орогенических процессов.

На ранних стадиях горообразования континентальная окраина «андского типа» развивалась из-за субдукции океанической плиты Фараллон под Североамериканскую плиту.

На последних стадиях орогенеза несколько террейнов океанической дуги «соединились» с западной окраиной Северной Америки в аккреционном орогене «кордильерского типа». Деформация, связанная с аккрецией террейнов вулканической дуги, в основном ограничена западными областями образовавшихся горных хребтов (горный хребет Кламат и Сьерра-Невада) и отсутствует в восточных регионах. Отмечается, что горы Кламат и Сьерра-Невада имеют схожую стратиграфию, что указывает на то, что они оба были сформированы в результате горообразования Невады.

В результате перемещения Йеллоустонской горячей точки и сопутствующих магматических процессов была образована кальдера McDermitt

(40 × 30 км) (рис. 2). Вулканическая постройка сформирована за счёт извержения туфа (порядка 1000 км³) около 16,39 ± 0,02 млн лет назад. Туфы McDermitt имеют чёткую зональность от ультращелочных риолитов с высоким содержанием SiO₂ до метаглиноземистых трахидацитов [13; 15].

Выделяются несколько этапов развития данной области [10; 13]:

- магматизм, предшествующий образованию кальдеры (докальдерный магматизм);
- мощное извержение, образующее кальдеру и систему кольцевых разломов (кальдерообразующий магматизм) с последующим образованием озера;
- вторичный магматизм после образования кальдеры (пост-коллапсный магматизм);
- период возрождения – образование купола в кальдере за счет движения магмы в области очага.

Геологическое строение кальдеры McDermitt. Отложения, приуроченные к кальдере, разделяются на внутрикальдерную зону и зону закальдерного пространства.

В зоне кальдеры McDermitt (рис. 3) есть доказанные проявления полезных ископаемых: ртути, урана, лития, золота и циркония [13]. Концентрирование полезных ископаемых связано с магматической, постмагматической гидротермальной деятельностью и наличием депрессионной структуры. Литиеносные отложения туфового генезиса

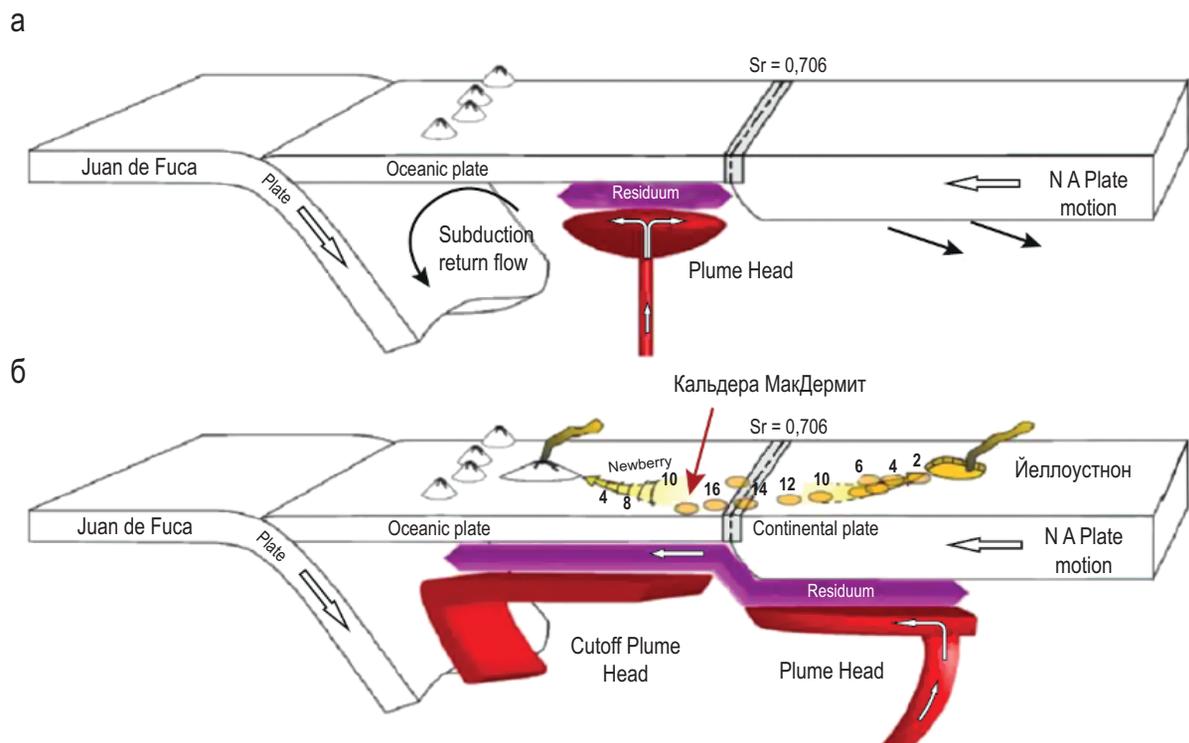


Рис. 2. Модель формирования трассы Йеллоустонской горячей точки (по Smith et al., 2009)

а – фаза воздействия (17 млн лет назад) плюма, расположенного под аккрецирующей океанической плитой Колумбийского плато в области субдукции Хуан-де-Фука, б – фаза современного состояния расщепленного плюма и взаимодействия, расположенного над ним деплетированного верхнемантийного блока с континентальной литосферой. NA – североамериканская плита. Цифрами показан средний возраст внутрикальдерных вулканических пород [23]

са, которые заполняют внутреннюю часть кальдеры, имеют форму линз, мощность – порядка 210 м. Многочисленные гидротермальные системы, вероятно, связанные с кальдерным магматизмом, а также наличие проводящих разломов для поступления высокоминерализованного флюида привело к образованию крупнейшего месторождения лития в глинистых толщах. Было обнаружено

незначительное золотое оруденение, а также подтверждено наличие Hg, Zr, U, Ga.

Наибольший интерес (с точки зрения формирования, обогащения и сохранения литиеносных толщ) имеют внутрикальдерные отложения (intra-caldera sediments, оранжевый цвет на карте (рис. 3)). Эта формация представляет собой первично туфогенные осадочные отложения, образовавшиеся

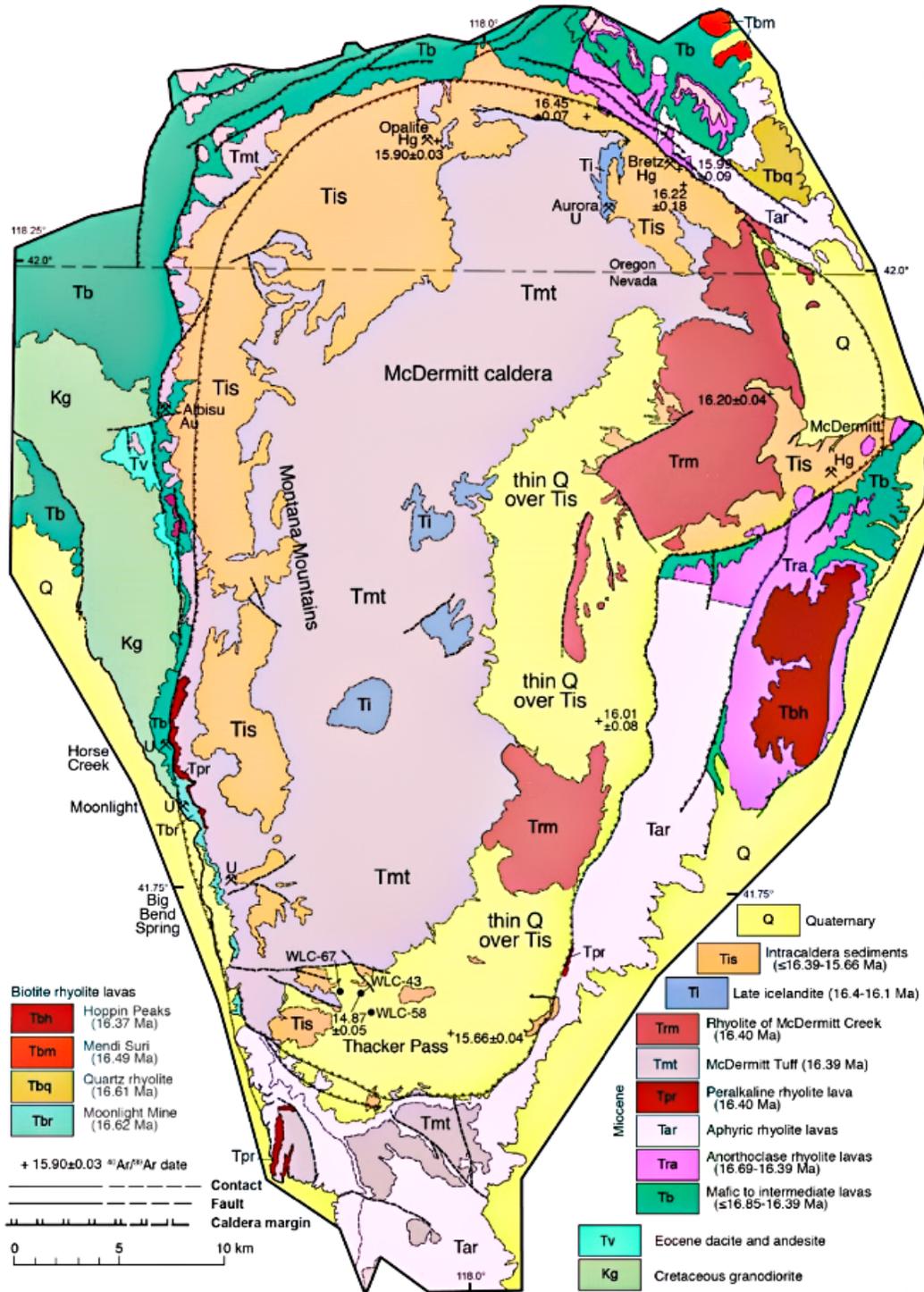


Рис. 3. Упрощенная геологическая карта кальдеры McDermitt (изображение заимствовано из [10])

в озерном бассейне кальдеры. В основном они обнажаются в краевых областях кальдеры и перекрывают отложения туфа McDermitt в центральной части, в т. ч. поздние исландиты (late islandite) и риолиты McDermitt Creek.

Строение месторождения Thacker Pass. Разрез месторождения литиевых глин Thacker Pass (рис. 4) в кальдере McDermitt представлен следующими отложениями [9; 10; 13]:

– Qfy – четвертичные отложения

Туфы и сопутствующие отложения McDermitt:

– Tis (внутрикальдерные осадочные отложения) – неоднородная толща преимущественно слабо обнаженных, слабо литифицированных вулканогенно-осадочных отложений, образованная 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 полевошпат и местами окремнены до опала и халцедона. Мощность – 190 м на Thacker Pass. Данные отложения являются литиеносными.

– Tmt (внутрикальдерный туф) представлен афировым риолитом (77% SiO₂) щелочного состава

– Tar – афировые риолиты SiO₂ (72–75%), характеризующие периоды докальдерной активности. Мощность отложений – от 10 до 200 м.

Генетическая модель образования месторождений литиеносных (гекторитовых) глин кальдерного типа. Глинистые отложения, обогащенные литием, представлены: гекторитами, иллитами и смектитами, встречаются по периметру всего бассейна кальдеры (отложения Tis), которые перекрыты четвертичными отложениями в южной части [2, 3, 7].

Осадконакопление смектитов в палеозере McDermitt началось вследствие взаимодействия обломков вулканического стекла с водными растворами в замкнутом бассейне кальдеры, где под-

стилающие туфы имели кислый и ультращелочной состав [9; 10]. Озерная обстановка характеризуется наличием карбонатов и кальцитовых конкреций, образованных в одно время со смектитом. В данных условиях сформировался магниевый смектит, подобный гекториту [Na_{0,3}(Mg,Li)₃Si₄O₁₀(OH)₂] [13], так как озерный рассол содержал повышенные значения Li⁺, Rb⁺, F⁻ и других растворенных веществ из-за выщелачивания данных элементов из ультращелочных риолитов McDermitt. Палеозеро служило водосборным бассейном для рудоносных флюидов и дальнейшего формирования глинистых отложений после множества циклов выпаривания в замкнутом бассейне. Литий сконцентрирован в глинистых минералах с равномерным распределением, концентрация лития растет по мере замещения первичного смектита иллитом. Наблюдается закономерность для рубидия – элемента, тесно ассоциирующего в природных образованиях с литием (рис. 5). Точечное содержание Li в иллите составляют от 1,3 до 2,4 масс. %. Помимо рубидия, литий в образцах коррелирует с магнием, бериллием, цезием и бором [10]. Анализы цельных пород из осадочных интервалов, в которых преобладает смектитовая глина, по всему диапазону кальдеры в среднем показывают результат от 1000 до 4000 ppm лития [2; 22], тогда как интервалы иллита, присутствующие только на перевале Thacker, варьируются от 4000 до 8000 ppm. (рис. 5) с максимальным измеренным содержанием Li ~9000 ppm [16; 18].

Линзы с очень высокими содержания лития месторождения Thacker Pass связаны с притоком литиеносных гидротермальных флюидов. Возрождение кальдеры, произошедшее 16,4–16,1 млн лет назад, привело к поднятию гор Монтана и образованию внутрикальдерных трещин и разломов, сосредоточенных к северу от месторождения вдоль западной окраины кальдеры [13]. Эти разломы служили подводными каналами для восходящих (рис. 5) гидротермальных флюидов [15]. Здесь под действием гидротермальных

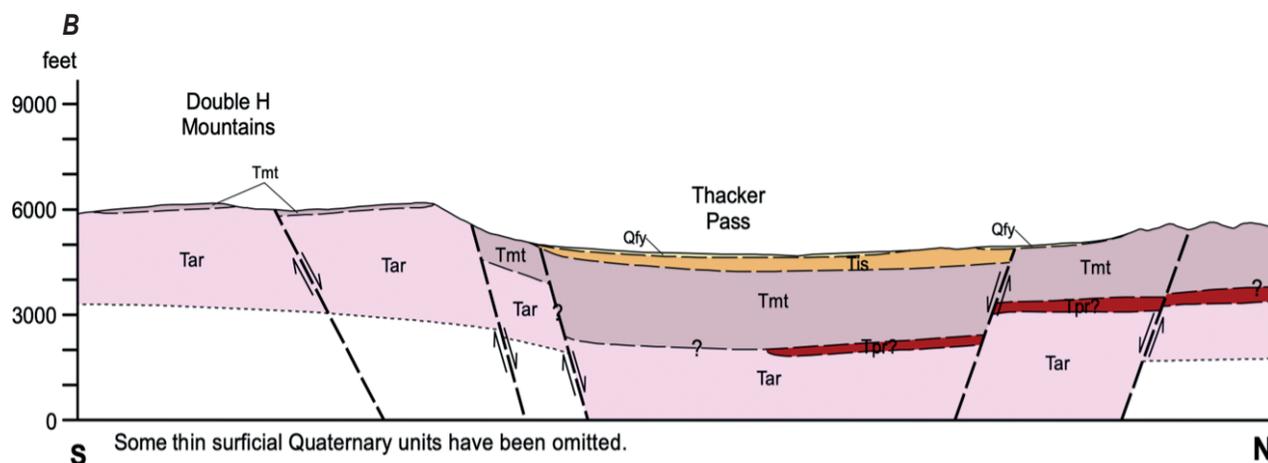


Рис. 4. Геологический разрез месторождения Thacker Pass (изображение заимствовано из [10])

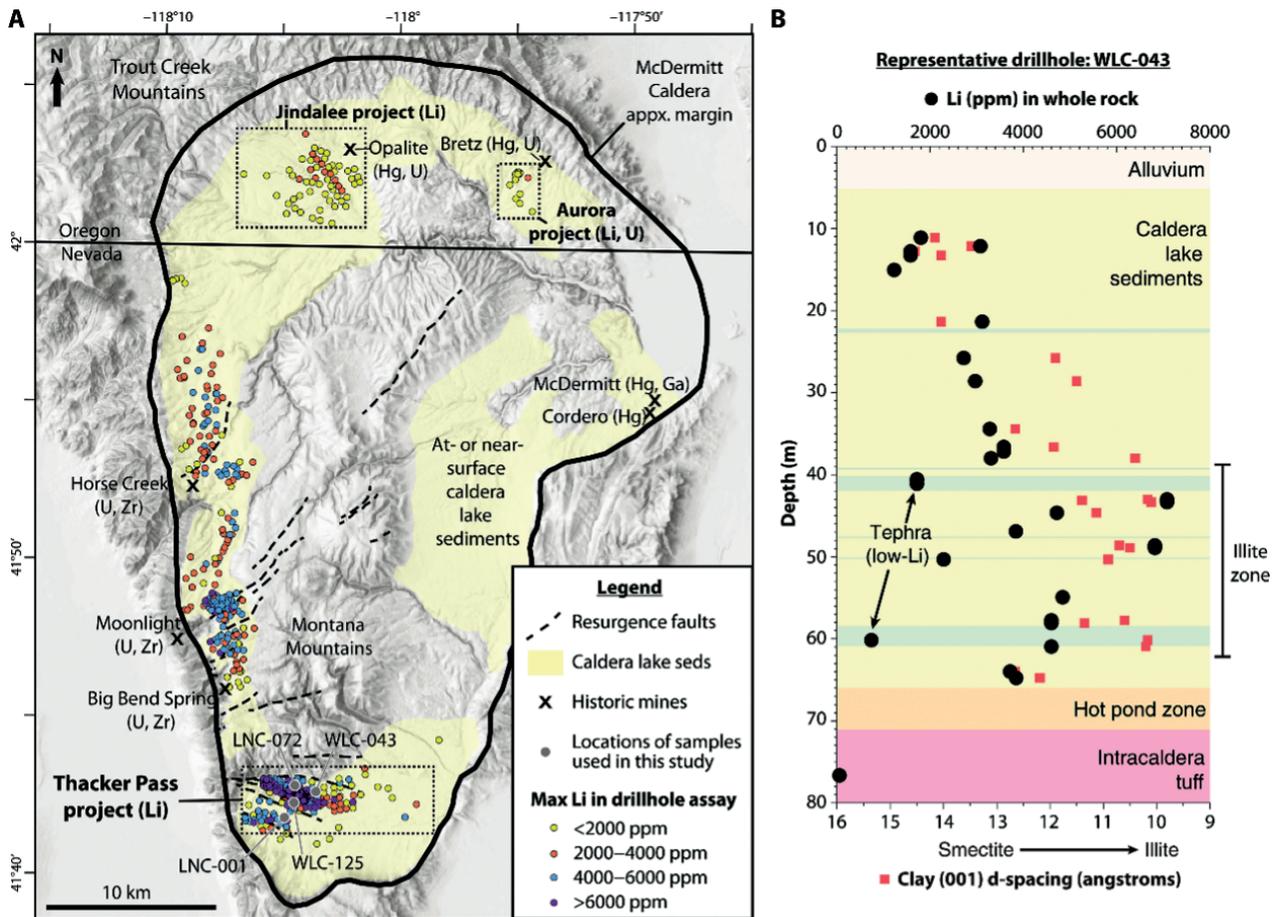


Рис. 5. Зоны распространения лития в кальдере (изображение заимствовано из статьи [9])

флюидов сформировались месторождения Мунайт, Хорс-Крик и Биг-Бенд-Спринг, весьма сильно обогащенные ураном, цирконием и другими металлами, которые обычно ассоциируются с эпитемальными месторождениями благородных металлов. По мере того, как первоначально горячие (>300 °C) флюиды охлаждались и поднимались в вулканобломочный внутрикальдерный осадоч-

ный разрез, они взаимодействовали с рассолами озерного происхождения и выщелачивали Li из богатых литием вулканических отложений, расположенных ближе к центру возрождения.

Исходя из модели формирования литиевых месторождений кальдерного типа, предложенной Benson (рис. 6), можно сделать вывод, что большой объем лав риолитового состава с умеренными

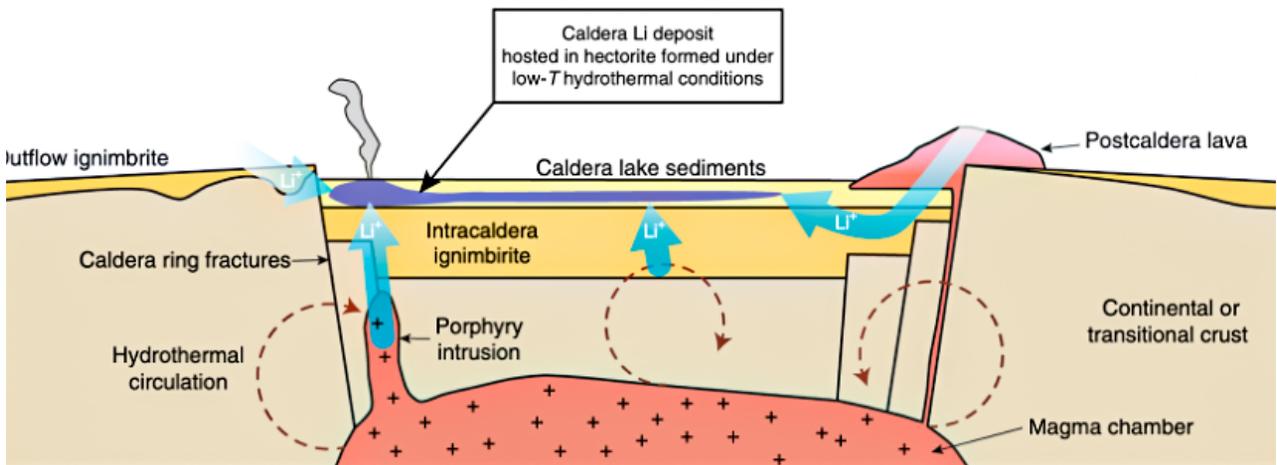


Рис. 6. Модель обогащения литием бассейна кальдеры McDermitt (изображение заимствовано из [9])

содержаниями лития являлся основным источником для «выщелачивания и транспортировки лития» в закрытый бассейн [5].

Дополнительными источниками лития являются окогенетические пост-кальдерные события – вторичные извержения и активная деятельность гидротермальных флюидов, циркулирующих вдоль систем разломов. 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 [18].

Несмотря на то, что эта модель основана на наблюдениях в кальдере McDermit, большинство характеристик типично для миоценовых кальдер во внутриконтинентальных условиях [12]. Большинство миоценовых кальдер сохраняют активную деятельность гидротермальной системы, поэтому могут содержать огромные ресурсы литиевой глины, подобные месторождению Thacker Pass. 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 [6].

В зонах современного вулканизма влияние гидротермальных процессов занимает важную роль с точки зрения транспортировки полезных ископаемых и формирования экономически выгодных скоплений. В области объекта изучения гидротермальные процессы связаны с магматической деятельностью. Перенос металлов флюидом в кальдере может происходить при дегазации магматического расплава, за счет движения ювенильных или рециклированных вод. Кальдера McDermit претерпела значительное изменение гидротермальными процессами вмещающих пород, которые зачастую происходили параллельно с магматизмом. Основная гидротермальная активность сконцентрирована в зоне кольцевой системы разломов, которая образовалась во время второго этапа магматической активизации, когда произошло формирование куполообразного поднятия Montana, сопровождающее образование трещин и разломов вдоль западной окраины кальдеры. Образованная система трещин послужила системой каналов для движения гидротермальных флюидов [13]. Гидротермальный циркон встречается в отложениях закальдерного пространства и в туфе McDermit вдоль западной системы разломов, также в этой зоне был найден адуляр на месторождении Moonlight Mine, подтверждающий гидротермальную активность в кальдере. Многочисленные месторождения ртути, которые были крупнейшими в США в период с 1933 по 1989 год, встречаются во внутрикальдерных туфогенных отложениях, вдоль северо-восточной и северной серий разломов. Наличие литийсодержащих глин

имеют широкое распространение во внутрикальдерной зоне в туфогенных отложениях. Наибольшей изученностью характеризуется область месторождения Thacker Pass.

Прогнозно-поисковые критерии месторождений лития данного типа. Потенциальными областями для поиска такого типа месторождений лития служат гидродинамически активные пояса миоцен-четвертичного возраста. Именно области присутствия молодого вулканизма являются 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 возможным действием геотермальных источников, образуя вулканическое озеро на поверхности изверженных пород (игнимбритов/туфов). Под действием гидротермальных процессов происходит метосоматоз; клиноптилолит, содержащийся в игнимбритах, претерпевает изменения и превращается в глинистые отложения и далее в гекторит. Гекторитовая пачка, образованная на дне вулканического озера, является адсорбентом лития и приобретает концентрацию лития от 0,16 до 0,74%. Действие постмагматических процессов продолжается, ввиду изменения давлений и объема магматического резервуара происходит воздымание кальдерного пространства (возрождение). Таким образом, после возрождения глинистые отложения обнажаются на поверхности. Коллапс и возрождение кальдеры, действие гидротермальных процессов являются ключевыми процессами для образования месторождений типа литиевых глин.

Главными факторами для поиска литиевых месторождений данного типа, по мнению авторов, являются:

- молодой вулканизм (кайнозойского возраста);
- наличие литиевого месторождения типа соляных озер (как индикатор)
- большой объем кислого вулканизма;
- активное действие гидротермальных процессов;
- наличие последовательных событий коллапса и возрождения кальдеры.

В 2021 г. был найден аналог месторождения Thacker Pass на территории Внутренней Монголии, расположенной в зоне Центральноазиатского складчатого пояса (ЦАСП) – месторождение Naomugeng [19].

Возможные аналоги месторождения Такер Пасс (Thacker Pass). Исходя из определенных ключевых критериев, был найден пример аналогичной обстановки потенциального месторождения литиевых глин на территории миоцен-четвертичной провинции на плато Puna-Altiplano.

Провинция имеет интересную геологическую историю. На протяжении кайнозойского тектонического и магматического (базальтовые потоки, игнимбритовые комплексы, шошонитовый вулка-

низм и др.) периода активности территория плато претерпела множественные эпизоды активации. При этом в период 27,0–5,0 млн лет магматическая активность захватывала область от Западных Кордильер до западной кромки Восточных Кордильер и к рубежу примерно 2 млн лет стала сосредоточена преимущественно в вулканической дуге Западные Кордильеры (рис. 7).

Данный объект является потенциальным местом для поиска залежей гекторитов по нескольким причинам:

- кальдера расположена в зоне миоцен-четвертичного кислого вулканизма (современного);
- согласно топографическому профилю, можно предполагать, что область кальдеры была заполнена вулканическим озером, после произошел этап возрождения, восточная часть кальдеры претерпела воздымание и донные озерные отложения обнажились на поверхности;
- в непосредственной близости есть касситеритовые месторождения с доказанным гидротер-

мальным генезисом, что свидетельствует о движении гидротермальных флюидов;

- наличие повышенных значений лития в озере вблизи кальдеры.

Авторами были выполнены полевые выезды и геологические маршруты в 2022 и 2023 гг. на плато Puna-Altiplano, где был проведен отбор проб рассола и твердой породы на серии объектов. Произведен также отбор геологического материала (рассола, глины и вулканической породы) на территории озера Laguna de Vilma (рис. 8).

Первичные результаты поверхностных проб рассола показывают содержание лития 48,5 мг/л и плотность воды 1,06 г/см³. 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.

Не менее интересны объекты-аналоги в областях молодого вулканизма нашей страны. Один

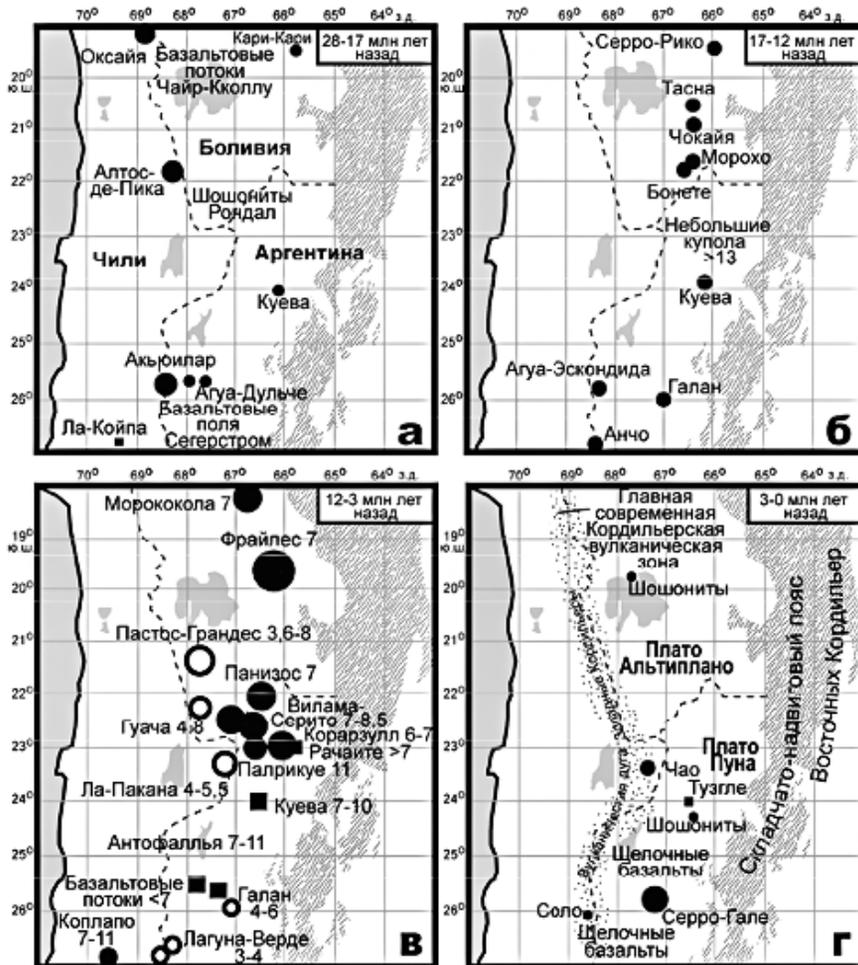


Рис. 7. Распределение по четырем временным отрезкам крупнейших олигоцен-четвертичных магматических полей (отмечены только надписями) и магматических центров (показаны символами)

Круги – игнимбритовые кальдеры, квадраты – стратовулканы; размер символов приблизительно пропорционален размерам вулканических систем, рядом с названиями в ряде случаев указан возраст. На схеме (v) незалитые круги соответствуют событиям моложе 7 млн лет, залитые – старше 7 млн лет (изображение заимствовано из [6])

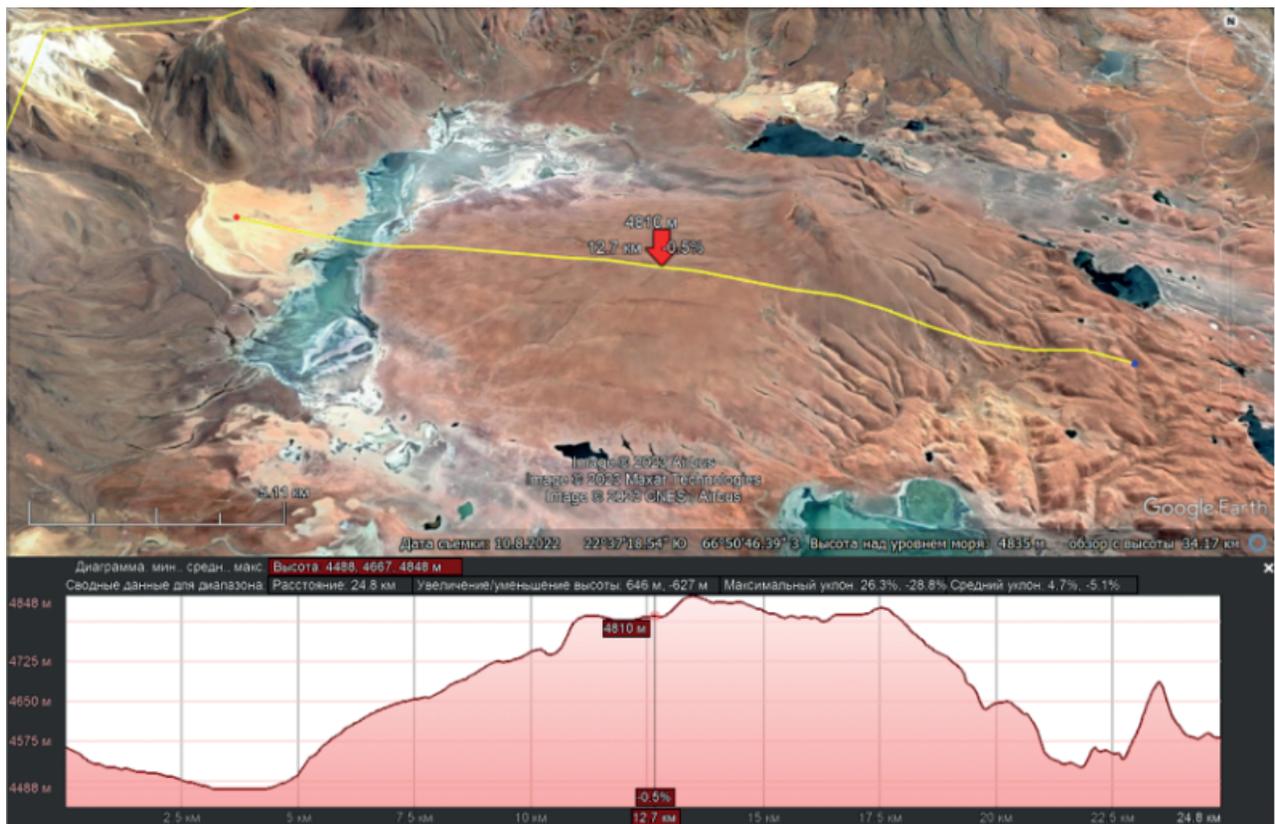


Рис. 8. Область кальдеры Laguna de Vilma на спутниковом снимке с топографическим профилем (снимок Д. А. Погребная, 2023)

из таких объектов известен в вулканогенно-активной зоне Камчатки. Это Узонско-Гейзерная вулкано-тектоническая депрессия [2; 4], в которой выделены и изучены Узонская и Гейзерная кальдеры. Здесь расположена самая крупная гидротермальная система Камчатки. По А. В. Кирюхину (2020 г.), Йеллоустонская (США) и Узон-Гейзерная (Камчатка, Россия) кальдеры являются примерами – индикаторами перераспределения разгрузки магмы и CO_2 .

Основным гидрогеохимическим барьером – осадителем редких щелочных элементов из термальных щелочных хлоридных вод является сорбционно-силикатный. Он образуется при резком снижении растворимости и осаждении кремнекислоты при понижении температуры в очагах разгрузки перегретых хлоридных вод. С ней осаждаются 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 [1; 2; 4]. Данные объекты имеют высокий потенциал с точки зрения разведки и добычи щелочных металлов на территории России.

Вывод – литиевые глины известны геологам уже давно, однако открытие очень крупного место-

рождения литиевых глин Thacker Pass (Такер Пасс) в кальдере McDermitt стало веским основанием вернуться к поиску объектов-аналогов на территории Южной Америки в области литиевых месторождений соляных озер с целью дополнительного увеличения ресурсной базы. Авторами статьи предложены критерии прогнозирования месторождений литиевых глин, а также выполнены полевые исследования с целью поиска образцов литиевых глин на территории потенциального объекта-аналога: Laguna de Vilma на плато Puna-Altiplano. В России – древних гидротермальных систем Сибирской платформы [3] и молодых гидротермальных систем вулканогенно-активной зоны Камчатки. Поиск и картирование месторождений-аналогов открывает потенциал к расширению ресурсной базы и введения в эксплуатацию нового типа месторождений литиевых глин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.
2. Голева Г. А. Гейзеры и горячие озера Кроноцкого заповедника (Камчатка). Путеводитель. – М.: Прогресс-Академия, 1993. – 64 с.
3. К минерации лития гидроминеральной провинции Сибирской платформы / А. Г. Вахромеев, И. В. Литвинова, Н. В. Мисюркеева, С. В. Алексеев, Д. А. Погребная // Геодинамическая эволюция литосферы

ры Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научной конференции. Вып. 20. – Иркутск : ИЗК СО РАН, 2022. – С. 43–45.

4. Кирюхин А. В. Магматический фразинг и гидротермальные системы под активными вулканами // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2020), 3–8 сентября 2020 г. – Петропавловск-Камчатский : ИВиС ДВО РАН, 2020. – С. 27–31.

5. Модель вторичного концентрирования литиевых рассолов в кипящих флюидных системах магматогенно-осадочных бассейнов гидроминеральной провинции Сибирской платформы / А. Г. Вахромеев, Е. В. Зелинская, И. В. Литвинова, Д. А. Погребная // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2023), 5–10 сентября 2020 г. – Петропавловск-Камчатский : ИВиС ДВО РАН, 2023. – С. 27–31.

6. Романюк Т. В., Ткачев А. В. Геодинамический сценарий формирования крупнейших мировых неоген-четвертичных бор-литиевых провинций. – М. : Светоч Плюс, 2010. – 304 с.

7. 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.

8. Топчиева О. М., Петровский В. А., Сухарев А. Е. Условия образования минеральных включений в гидротермальных метасоматитах г. Двугорбой, Южная Камчатка // Вестник Пермского университета. – 2018. – Т. 17, № 1. – С. 1–10.

9. Benson T. R., Coble M. A., Dilles J. H. Hydrothermal enrichment of lithium in intracaldera illite-bearing claystones // Science Advances. – 2023. – Vol. 9, no. 35. – Pp. 1–10.

10. 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, no. 1. – Pp. 68.

11. DiPietro J. A. Geology and landscape evolution: General principles applied to the United States. – Elsevier, 2018.

12. Gallup D. L. Geochemistry of geothermal fluids and well scales, and potential for mineral recovery // Ore geology reviews. – 1998. – Vol. 12, no. 4. – Pp. 225–236.

13. Geology and evolution of the McDermitt caldera, northern Nevada and southeastern Oregon, western USA / C. D. Henry, S. B. Castor, W. A. Starkelet et al. // Geosphere. – 2017. – Vol. 13, no. 4. – Pp. 1066–1112.

14. Global lithium availability: A constraint for electric vehicles? / P. W. Gruber, P. A. Medina, G. A. Keoleian et al. // Journal of Industrial Ecology. – 2011. – Vol. 15, no. 5. – Pp. 760–775.

15. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits / S. E. Kesler, P. W. Gruber, P. A. Medina et al. // Ore geology reviews. – 2012. – Vol. 48. – Pp. 55–69.

16. Ingraffia 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. – Pp. 395–410.

17. Lithium Americas Expands Resource at Thacker Pass and Increases Phase 1 Capacity to Target 40,000 tpa Lithium Carbonate [Electronic resource]. – URL: https://lithium-argentina.com/files/doc_news/Lithium-Americas-Expands-Resource-at-Thacker-Pass-and-Increases-Phase-1-Capacity-to-Target-40000-tpa-Lithium-Carbonate-10-07-2021-2021.pdf (12.04.2024).

18. Lithium enrichment in intracaldera rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins / T. R. Benson, M. A. Coble, J. J. Rytuba et al. // Nature communications. – 2017. – Vol. 8, no. 1. – Pp. 270.

19. Metallogenic Characteristics and Formation Mechanism of Naomugeng Clay Type Lithium Deposit in Central Inner Mongolia, China / C. Li, Z. Li, T. Wu et al. // Minerals. – 2021. – Vol. 11, iss. 3. – Pp. 238.

20. Mineral Commodity Summaries 2024 // U. S. Geological Survey. – 2024. – 216 p.

21. Shaw R. A. Global lithium (Li) mines, deposits and occurrences. – Keyworth : Nottingham British Geological Survey, 2021.

22. Towards a low-carbon society: A review of lithium resource availability, challenges and innovations in mining, extraction and recycling, and future perspectives / C. B. Tabellin, J. Dallas, S. Casanova et al. // Minerals Engineering. – 2021. – Vol. 163. – Pp. 106743.

23. Uranium-Bearing Volcanic Structures: Streltsovka (Russia), Xiangshan (China), and McDermitt (United States). A Comparative Analysis of the Petrology of Felsic Volcanics and the Composition of Near-Ore Metasomatites / V. A. Petrov, O. V. Andreeva, V. V. Poluektov, D. V. Kovalenko // Geology of Ore Deposits. – 2021. – Vol. 63. – Pp. 1–28.

REFERENCES

1. Boyarko G. Yu., Khat'kov V. Yu., Tkacheva E. V. Syr'evoy potentsial litiya Rossii. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2022, vol. 333, no. 12, pp. 7–16.

2. Goleva G. A. Geyzery i goryachie ozera Kronotskogo zapovednika (Kamchatka). Putevoditel'. Moscow, Progress-Akademiya, 1993, 64 p.

3. Vakhromeev A. G., Litvinova I. V., Misyurkeeva N. V., Alekseev S. V., Pogrebная D. A. K mineragenii litiya gidromineral'noy provintsii Sibirskoy platformy. *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvzhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): Materialy nauchnoy konferentsii. Vyp. 20*. Irkutsk, IZK SO RAN, 2022, pp. 43–45.

4. Kiryukhin A. V. Magmaticheskiy fraking i gidrotermal'nye sistemy pod aktivnymi vulkanami. *Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Geotermal'naya vulkanologiya, gidrogeologiya, geologiya nefi i gaza» (Geothermal Volcanology Workshop 2020)*, 3–8 sentyabrya 2020 g. Petropavlovsk-Kamchatskiy, IViS DVO RAN, 2020, pp. 27–31.

5. Vakhromeev A. G., Zelinskaya E. V., Litvinova I. V., Pogrebная D. A. Model' vtorichnogo kontsentrirvaniya litienosnykh rassolov v kipyashchikh flyuidnykh sistemakh magmatogennno-osadochnykh basseynov gidromineral'noy provintsii Sibirskoy platformy. *Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Geotermal'naya vulkanologiya, gidrogeologiya, geologiya nefi i gaza» (Geothermal Volcanology Workshop 2023)*, 5–10 sentyabrya 2020 g. Petropavlovsk-Kamchatskiy, IViS DVO RAN, 2023, pp. 27–31.

6. Romanyuk T. V., Tkachev A. V. Geodinamicheskiy stseneriy formirovaniya krupneyshikh mirovykh neogenchetvertichnykh bor-litienosnykh provintsiiy. Moscow, Svetoch Plyus, 2010, 304 p.

7. Rychagov S. N. Gigantskie gazo-gidrotermal'nye sistemy i ikh rol' v formirovaniy parodominiruyushchikh geotermal'nykh mestorozhdeniy i rudnoy mineralizatsii. *Vulkanologiya i seysmologiya*, 2014, no. 2, pp. 3–28.

8. Topchieva O. M., Petrovskiy V. A., Sukharev A. E. Usloviya obrazovaniya mineral'nykh vklucheniy v gidrotermal'nykh metasomatitakh g. Dvugorboy, Yuzhnaya Kamchatka. *Vestnik Permskogo universiteta*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 1–10.

9. Benson T. R., Coble M. A., Dilles J. H. Hydrothermal enrichment of lithium in intracaldera illite-bearing claystones. *Science Advances*, 2023, vol. 9, no. 35, pp. 1–10.
10. 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, no. 1, pp. 68.
11. DiPietro J. A. *Geology and landscape evolution: General principles applied to the United States*. Elsevier, 2018.
12. Gallup D. L. Geochemistry of geothermal fluids and well scales, and potential for mineral recovery. *Ore geology reviews*, 1998, vol. 12, no. 4, pp. 225–236.
13. Henry C. D., Castor S. B., Starkelet W. A. et al. Geology and evolution of the McDermitt caldera, northern Nevada and southeastern Oregon, western USA. *Geosphere*, 2017, vol. 13, no. 4, pp. 1066–1112.
14. Gruber P. W., Medina P. A., Keoleian G. A. et al. Global lithium availability: A constraint for electric vehicles? *Journal of Industrial Ecology*, 2011, vol. 15, no. 5, pp. 760–775.
15. Kesler S. E., Gruber P. W., Medina P. A. et al. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore geology reviews*, 2012, vol. 48, pp. 55–69.
16. 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, pp. 395–410.
17. Lithium Americas Expands Resource at Thacker Pass and Increases Phase 1 Capacity to Target 40,000 tpa Lithium Carbonate [Electronic resource]. URL: https://lithium-argentina.com/files/doc_news/Lithium-Americas-Expands-Resource-at-Thacker-Pass-and-Increases-Phase-1-Capacity-to-Target-40000-tpa-Lithium-Carbonate-10-07-2021-2021.pdf (12.04.2024).
18. Benson T. R., Coble M. A., Rytuba J. J. et al. Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins. *Nature communications*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 270.
19. Li C., Li Z., Wu T. et al. Metallogenic Characteristics and Formation Mechanism of Naomugeng Clay Type Lithium Deposit in Central Inner Mongolia, China. *Minerals*, 2021, vol. 11, iss. 3, pp. 238.
20. Mineral Commodity Summaries 2024. *U. S. Geological Survey*, 2024, 216 p.
21. Shaw R. A. Global lithium (Li) mines, deposits and occurrences. Keyworth, Nottingham British Geological Survey, 2021.
22. Tabelin C. B., Dallas J., Casanova 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, pp. 106743.
23. Petrov V. A., Andreeva O. V., Poluektov V. V., Kovalenko D. V. Uranium-Bearing Volcanic Structures: Streltsovka (Russia), Xiangshan (China), and McDermitt (United States). A Comparative Analysis of the Petrology of Felsic Volcanics and the Composition of Near-Ore Metasomatites. *Geology of Ore Deposits*, 2021, vol. 63, pp. 1–28.

Погребная Дарья Александровна – аспирант, ИЭК СО РАН¹, ООО «Энерджи Крафт»². <dapogrebnyaya@energy-craft.com>
Вахромеев Андрей Гелиевич – доктор геол.-минерал. наук, профессор, зав. лабораторией, ИЭК СО РАН¹, ИРНТУ³.
 <andrey_igp@mail.ru>

Ковалевский Вацлав Сергеевич – аспирант, МГУ⁴, ООО «Энерджи Крафт»². <vskovalevsky@energy-craft.com>

Pogrebnaia Daria Aleksandovna – PhD Student, IEC SB RAS¹, Energy Craft LLC². <dapogrebnyaya@energy-craft.com>
Vakhromeev Andrei Gelievich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Head of Laboratory, IEC SB RAS¹, INRTU³. <andrey_igp@mail.ru>

Kovalevskiy Vatslav Sergeevich – PhD Student, MSU⁴, Energy Craft LLC². <vskovalevsky@energy-craft.com>

¹ Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЭК СО РАН). Ул. Лермонтова, 128, Иркутск, Россия, 664033.

Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IEC SB RAS) 128 Ul. Lermontova, Irkutsk, Russia, 664033.

² ООО «Энерджи Крафт». Большой Саввинский пер., 8, стр. 1, Москва, Россия, 119435.

Energy Craft LLC. 8, str. 1 Bolshoy Savvinski lane, Moscow, Russia, 119435.

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНТУ). Ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия, 664074.

Irkutsk National Research Technical University (INRTU). 83 Ul. Lermontova, Irkutsk, Russia, 664074.

⁴ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ). Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991. Ломоносов Moscow State University (MSU). 1 Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991.