
Научная статья

УДК 550.42

DOI: 10.31084/2619-0087/2024-2-6

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ГЕОХИМИИ ЛИТИЯ И ЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В РИФЕЙСКИХ ПОРОДАХ ЮЖНОГО УРАЛА

А. Г. Султанова, С. В. Мичурин

Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, г. Уфа, anna_zakharova.ig@mail.ru

Приведены краткие сведения о современном состоянии литиевой проблемы в мире, в том числе об изученности и распределении лития в рифейских породах Южного Урала. Показана его применимость и востребованность различными мировыми отраслями промышленности на сегодняшний день. Лидерами по запасам литиевого сырья в настоящее время являются Чили, Китай, Аргентина, Австралия. В России, несмотря на обладание ею крупными ресурсами и запасами лития, из-за расположения сырьевых объектов в экономически неосвоенных районах и сложности технологических схем обогащения, месторождения не разрабатываются. Главными минералами — сырьевыми источниками лития — являются сподумен, лепидолит, в меньшей степени — петалит, амблигонит, циннвальдит. Наиболее Li-содержащей является рапа соляных озер, где литий присутствует в виде различных сульфатных и хлоридных соединений. Основные промышленные месторождения лития включают пегматитовый, гранитный, кальдерный и саларный типы. На Южном Урале выделяются два стратиграфических интервала обогащения пород литием: ниже- и среднерифейский. Первый из них связан с отложениями суранской, второй — авзянской (кужинской) свит. В Суранском селлаит-флюоритовом месторождении выявлено присутствие криолитионита, в суранской и авзянской свитах предполагается присутствие флогопита. Слабая изученность геохимии лития в рифейских породах Южного Урала диктует проведение дальнейших геологических и геохимических исследований в этом направлении. Показано, что рифейские отложения Башкирского мегантиклинория могут быть перспективны на обнаружение повышенных концентраций лития.

Ключевые слова: Литий, сподумен, лепидолит, флюорит, рифей, Южный Урал

Благодарности: Исследование выполнено в рамках Государственного задания ИГ УФИЦ РАН № FMRS-2022–0015.

Original article

SOME ISSUES OF LITHIUM GEOCHEMISTRY AND ITS DISTRIBUTION IN RIFHEAN ROCKS OF THE SOUTHERN URALS

A. G. Sultanova, S. V. Michurin

Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, anna_zakharova.ig@mail.ru

Brief information is provided on the current state of the lithium problem in the world, including the knowledge and distribution of lithium in the Riphean rocks of the Southern Urals. Its applicability and

Для цитирования: Султанова А. Г., Мичурин С. В. Некоторые вопросы геохимии лития и его распределение в рифейских породах Южного Урала // Геологический вестник. 2024. №2. С. 65–80. DOI: 10.31084/2619-0087/2024-2-6

For citation: Sultanova A. G., Michurin S. V. (2024) Some issues of lithium geochemistry and its distribution in Rifhean rocks of the Southern Urals. *Geologicheskii vestnik*. 2024. No. 2. P. 65–80. DOI: 10.31084/2619-0087/2024-2-6

© А. Г. Султанова, С. В. Мичурин, 2024

relevance in various global industries today is shown. The leaders in reserves of lithium raw materials are currently Chile, China, Argentina, and Australia. In Russia, despite its possession of large resources and reserves of lithium, due to the location of raw material facilities in economically undeveloped areas and the complexity of technological enrichment schemes, deposits are not developed. The main minerals — raw materials sources of lithium — are spodumene, lepidolite, and, to a lesser extent, petalite, amblygonite, and zinnwaldite. The most Li-containing brine is the brine of salt lakes, where lithium is present in the form of various sulfate and chloride compounds. The main commercial lithium deposits include pegmatite, granite, caldera and salar types. In the Southern Urals, two stratigraphic intervals of lithium enrichment are distinguished: Lower and Middle Riphean. The first of them is associated with deposits of the Suran formation, the second — with the Avzyan (Kuzha) formations. The presence of cryolithionite was revealed in the Suran sellaite-fluorite deposit; the presence of phlogopite is assumed in the Suran and Avzyan formations. Poor knowledge of the geochemistry of lithium in the Riphean rocks of the Southern Urals dictates further geological and geochemical research in this direction. It is shown that Riphean deposits of the Bashkirian meganticlinorium may be promising for the detection of increased lithium concentrations.

Keywords: Lithium, spodumene, lepidolite, fluorite, Riphean, Southern Urals

Acknowledgments: The research was carried out on the subject № FMRS-2022–0015 of the state task to the Institute of Geology UFRC RAS.

Введение

К литиевому сырью в последнее время усилился интерес со стороны геологоразведочных компаний и служб во многих странах мира, начавших активнее реализовывать поисково-оценочные и разведочные проекты как на ранее известных, так и вновь выявленных проявлениях лития на всех континентах. Аналогичные тенденции проявились и в количестве научных публикаций геологической, геолого-экономической и технологической направленности, рассматривающих литиевую проблематику на разных уровнях: от отдельного месторождения до глобального анализа [Ткачев и др., 2018; Кудрявцев, Кудрявцев, 2018; Боярко и др., 2022; Миронов и др., 2022; Szlugaj, Radwanek-Bak, 2022; Lindagato et al., 2023].

За последние годы литий стал одним из наиболее востребованных в мире военными и гражданскими отраслями промышленности редких металлов. Литий используют в виде сверхлёгких сплавов с магнием, алюминием в авиастроении и космической промышленности [Nicholson, 1978]. Он широко применяется в производстве щелочных аккумуляторов, в установках для регенерации воздуха, производстве специальных стёкол и керамики [Sheets, 2000]. В атомной промышленности литий используется для получения трития — важнейшего компонента термоядерной энергетики [Ktalkherman et al., 2009]. Литий и его соединения — важнейшие компоненты специального топлива ракет, сверхзвуковых самолётов и подводных лодок.

Мировое потребление лития сохраняет высокие перспективы роста, за счет спроса на батареи для энергетического перехода, а также

перспектив роста производства аккумуляторов для электромобилей. Согласно прогнозам с 2022 по 2025 гг. мировое потребление карбоната лития увеличится с 797 тысяч тонн до 1428 тысяч тонн [Ежеквартальный бюллетень ..., 2023]. Растущий спрос на литий отражает энергетический переход и увеличение инвестиций в системы хранения энергии. По данным фирмы «Benchmark Mineral Intelligence», запасы карбоната лития у производителей аккумуляторов находятся на низком или нулевом уровне. Из-за высокого спроса на производство аккумуляторов для электромобилей текущие темпы добычи лития недостаточны и к 2024 г. спрос на него увеличится в ~2.5 раза [Миронов и др., 2022]. Прогноз Международного энергетического агентства говорит о том, что к 2040 г. востребованность лития на рынке вырастет примерно в 40 раз.

В 2022 г. цена на гидроксид лития составила в среднем 67 тыс. долларов за 1 т., что значительно выше средней цены (~13 тыс.) в 2019 г [Szlugaj, Radwanek-Bak, 2022]. Высокие цены в 2021 и 2022 гг. стимулировали увеличение инвестиций в производство лития, в результате чего глобальное предложение догнало спрос. Согласно прогнозам к 2025 г. цены на литий должны снизиться, поскольку его рынок вступает в период избытка предложения, что, как ожидается, приведет к увеличению запасов. Однако, вероятно, цены останутся значительно выше уровня, который наблюдался в течение нескольких лет до 2021 г. Цена на гидроксид лития должна составить примерно 37 тыс. долларов США за тонну в 2025 г. [Ежеквартальный бюллетень ..., 2023].

Ранее авторами был приведен краткий литературный обзор геохимии лития, в том числе

применительно к рифейским отложениям Южного Урала [Султанова, 2024]. В настоящем сообщении рассматриваются более широкие сведения по этой проблеме и подробно анализируются опубликованные данные по содержанию лития в породах рифея Башкирского мегантиклинория. Цель изучения — привлечь внимание исследователей южноуральских рифейских отложений к актуальной литиевой проблематике и показать, что указанные породы могут быть перспективны на обнаружение повышенных концентраций лития.

Геохимические особенности лития

Литий находится в главной подгруппе первой группы таблицы Д. И. Менделеева среди щелочных металлов. Он является s-элементом по строению электронной оболочки атома. У него на внешнем слое присутствует один s-электрон ($2s^1$), что делает его одновалентным. Радиус иона (нм) одновалентного лития (L^+ 0.068) меньше радиусов всех щелочных металлов. Он близок по размеру к радиусам ионов трёхвалентных алюминия и железа (Al^{3+} 0.067, Fe^{3+} 0.067) и двухвалентного магния (Mg^{2+} 0.074).

Литий распространен в природе только в виде соединений и является типично литофильным элементом. Он входит в состав многих горных пород, но преимущественно концентрируется в кислых изверженных и осадочных породах (до 0.007 мас. %, табл. 1) [Войткевич и др., 1990]. В распределении его содержания в магматических породах выявляется четкая тенденция в обогащении пород кислого состава, что позволяет относить литий к гранитофильным элементам. На начальном этапе магматического процесса литий преимущественно переходит в состав базальтовой магмы, о чем свидетельствует повышение его содержания в базальтах по сравнению с гипербазитами. В базальтоидах литий ввиду низкого кларка ($1.7 \cdot 10^{-3}$ мас. %, см. табл. 1), находится в рассеянном состоянии и благодаря близости радиуса иона к радиусам ионов алюминия, железа и магния входит в состав

плагиоклазов, пироксенов, магнетита. На следующем этапе, когда из базальтоидов выплавляется магма среднего состава, содержание лития в ней практически не изменяется. Только в кислых магмах содержание лития вновь увеличивается (см. табл. 1). Особенно велики его содержания в лейкократовых S-гранитах складчатых областей, с которыми чаще всего связаны его месторождения. Это коровые граниты, формирующиеся в результате плавления земной коры. В них количество лития бывает повышено вместе с Mo, Sn, Nb, Ta. Он накапливается в остаточных продуктах кислого магматизма — пегматитах.

Близость ионных радиусов Li^+ и Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} позволяет литию замещать указанные элементы в кристаллических решётках минералов. Однако порообразующие элементы гранитоидов O^{2-} (0.136), Si^{4+} (0.039), K^+ (0.133), Na^+ (0.098) он может замещать с трудом ввиду малого радиуса по отношению к щелочным металлам и кислороду или большего по отношению к кремнию. Скорее всего, именно по этой причине литий накапливается в остаточных расплавах кислых магм и в составе пегматитов. Важно отметить и близость радиуса иона лития к радиусам таких редких элементов, как Ta^{5+} (0.066), Nb^{5+} (0.066), W^{6+} (0.065), Sn^{4+} (0.067), что обеспечивает их совместное нахождение в пегматитах и грейзенах.

Установлено существование в пегматитах гетеровалентного изоморфизма одновалентного лития во флогопите: Al^{3+} (0.067) + Mg^{2+} (0.074) \leftrightarrow Si^{4+} (0.039) + Li^+ (0.068); циннвальдите и турмалине: $2Fe^{2+}$ (0.080) \leftarrow Al^{3+} (0.067) + Li^+ (0.068); берилле: Be^{2+} (0.034) \leftarrow Li^+ (0.068) + Na^+ (0.098) [Булах и др., 2014]. В метасоматических процессах алюмосиликаты гранитоидов разлагаются и литий выносятся. Он мигрирует преимущественно в составе фтористых соединений, о чем свидетельствуют ореолы флюорита в месторождениях. Именно по этой причине литий накапливается в месторождениях флюорита.

Таблица 1 Кларк лития в различных типах горных пород, мас. %
(по К. Таркьяну и К. Ведеполу [Войткевич и др., 1990])
Table 1 Clark lithium in various types of rocks, wt. %
(according to K. Tarkyan and K. Wedepohl [Voitkevich et al., 1990])

Изверженные породы				Осадочные породы			
ультраосновные $\times 10^{-4}$	основные $1.7 \cdot 10^{-3}$	кислые		сиениты $2.8 \cdot 10^{-3}$	глины $6.6 \cdot 10^{-3}$	песчаники $1.5 \cdot 10^{-3}$	карбонатные $5 \cdot 10^{-4}$
		богатые Са $2.4 \cdot 10^{-3}$	бедные Са $4 \cdot 10^{-3}$				

В экзогенных условиях литий ведёт себя как активный щелочной металл, концентрируясь вместе с Na и Mg в рассолах и эвапоритах. Таким образом, с геохимической точки зрения возможны концентрации лития в остаточных продуктах кислого магматизма и в результате их метасоматической переработки, а также в экзогенных рассолах.

Минералы-концентраторы лития

Литий обнаружен более чем в 50 минералах, хотя собственных минералов лития известно 28. Многие из них чрезвычайно редки, и их находки являются единичными. Большая часть минералов лития — силикаты (преобладают), фосфаты и лишь по одному приходится на галогениды, оксиды и бораты.

Главными сырьевыми источниками лития являются сподумен и лепидолит. На их долю в мировой добыче литиевого сырья приходится 60 и 22% соответственно. Другие минералы — петалит (13%), амблигонит (1.3%), циннвальдит (0.7%) — играют существенно меньшую роль. Лепидолит рассматривается как серия минералов триоктаэдрических слюд [Brigatti et al., 2000], промежуточных членов изоморфного ряда трилитионит $\text{KLi}_{1.5}\text{Al}_{1.5}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}\text{F}_2$ — полилитионит $\text{KLi}_2\text{AlSi}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$, а циннвальдит (тёмные литийсодержащие слюды) как серия минералов, промежуточных членов изоморфного ряда сидерофиллит $\text{KFe}_2\text{Al}(\text{Si}_2\text{Al}_2)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ — полилитионит.

Накопление Li, Rb, Cs, Be в гранитных пегматитах и образование в них собственных минералов объясняется, прежде всего, тем, что эти щелочные литофильные элементы в магме могут накапливаться только в поздних кислых, а не в ранних ультраосновных и основных расплавах. Здесь их концентрации возрастают в десятки и сотни раз, достигая десятых долей и первых процентов, и создаются благоприятные условия для образования самостоятельных минералов. Например, главная масса лития (активная щелочь) будет связывать слабый ангидрид кремния с помощью алюминия (слабое основание) в сподумен ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$), а при наличии в расплаве фосфорного ангидрида и фтора может образоваться литиевый фосфат — амблигонит $\text{LiAl}(\text{PO}_4)\text{F}$ [Зими́на и др., 2014].

Промышленные месторождения лития

Формирование месторождений лития связано с эндогенными и экзогенными процессами рудо-

генеза. Месторождения лития, относящиеся к категории промышленных, включают четыре типа: 1) пегматитовый, 2) гранитный, 3) кальдерный, 4) сальарный [Линде и др., 2000]. Наряду с этим в качестве перспективного источника лития также рассматриваются геотермальные воды геодинамически активных областей и подземные воды нефтяных полей. Практический интерес геологоразведочных компаний к месторождениям лития вызывают, как правило, те из них, ресурсная оценка которых (включая возможную прошлую добычу) составляет не менее 0.1 млн т Li_2O . Нижний лимит минимального среднего содержания при этом принимается 0.4% Li_2O [Борисенко и др., 1980; Месторождения стратегических ..., 2020].

Пегматитовый тип представляют жильные корунд-олигоклазовые породы (плюмазиты) с содержанием корунда на уровне 15–20%, примесью ортоклаза и слюд двух типов и/или мусковитовые граниты и лейкограниты. Пегматиты часто оторваны от материнских гранитов и локализованы в метавородах любого состава, изменённых на уровне не ниже зеленосланцевой фации. Рудные скопления проявлены в виде жилообразных и дайкообразных тел, иногда одиночных, но обычно в составе групп, эшелонированных по простиранию и падению. Минеральные типы и подтипы включают комплексный (микроклин-альбит-сподуменовый, микроклин-альбит-петалитовый, микроклин-альбит-лепидолитовый подтипы) и альбит-сподуменовый. Концентраторы лития — сподумен, петалит, лепидолит, амблигонит, эвкриптит, циннвальдит, литиевый мусковит. В ассоциацию с литием могут входить Ta, Sn, Be, Cs, Rb, Nb.

Анализ геодинамических условий формирования крупных полей сподуменовых пегматитов с литиевыми и комплексными (Li, Cs, Ta, Be, Sn) рудами редких металлов в пределах Центрально-Азиатского складчатого пояса позволил отечественным специалистам установить временной разрыв (от первых десятков до сотен млн лет) между сподуменовыми пегматитами и обычно считающимися материнскими гранитами [Загорский и др., 2014]. Выделен самостоятельный пегматитовый этап в истории магматизма. От докембрия до позднего мезозоя установлена связь крупных полей слюдоносных пегматитов с обстановками растяжения континентальной литосферы, которые проявляются либо в виде зон долгоживущих глубинных разломов, ограничивающих троговые (рифтогенные) структуры, испытавшие процессы тектономагматической активизации, либо в виде

постколлизийных зон сдвига-раздвиговых деформаций. Образованию редкометалльных пегматитов в значительной мере способствует наличие достаточно мощной зрелой коры, рассекаемой глубинными (вплоть до верхней мантии) длительно действующими разломами – проводниками энергии и вещества из глубинных источников.

Гранитный тип связан с плюмазитовыми Li-F редкометалльными гранитами. Рудные тела представляют собой грейзенизированные верхние части штокообразных, куполовидных или плитообразных массивов Li-F гранитов и их надинтрузивные грейзены. Концентраторы лития — лепидолит, циннвальдит, сподумен, амблигонит, литиевый мусковит. В ассоциацию с литиевыми минералами может входить флюорит, а также Sn, Be, Ta, Cs, Rb, Nb, W.

Кальдерный тип. В состав магматических пород, вмещающих кальдеры, могут входить в различном соотношении субвулканические тела, лавы и туфы разных составов от трахитов до онгонитов, реже — андезиты и базиты. Минерализованные слои или пластообразные зоны в породах, формировавшихся в крупных субаэральных кальдерах, включают осадки внутрикальдерных озер. Вмещающими породами являются туфоалевролиты, туффизитовые брекчии, туфы, туффиты, боратоносные слои, песчаники. Включает следующие подтипы: углеродистый, пепловый, глинистый, ядаритовый. Концентраторы лития — литиеносные монтмориллонит, иллит, ядарит (минерал лития, недавно открытый в Сербии) [Толкушкина и др., 2012; Кудрявцев, Кудрявцев, 2018], вулканический пепел, гекторит, углеродистое вещество, лепидолит, литиевый мусковит. В ассоциации с литием находятся бор и калий.

Саларный тип. Салары представляют собой бессточные понижения земной поверхности, заполненные солями (Salar — «солить»), применительно к литию — рапа бессточных соленых озер с содержанием 0.06–0.5% Li₂O. Они особенно распространены на территории Чили, Аргентины и Китая, представляя собой, по существу, гидроминеральные месторождения лития.

Геотермальные воды геодинамически активных областей и подземные воды нефтяных полей по агрегатному состоянию и химическому составу литийсодержащего сырья аналогичны саларам, но по средним содержаниям они редко достигают уровня самых бедных рассолов. Поэтому изучение таких литиеносных минеральных вод к настоящему времени не продвинулось дальше экспериментальных полупромышленных испытаний извлечения

лития. Результаты этих испытаний не подтверждают рентабельность производства, и поэтому литиеносные геотермальные воды и воды нефтяных полей пока не используются для промышленной добычи лития.

Наиболее репрезентативная сводка размещения важнейших месторождений лития в мире охарактеризованных выше типов (за исключением саларного) выполнена специалистами Государственного геологического музея им. В. И. Вернадского. Кроме указания местоположения месторождений лития, затронуты вопросы их принадлежности к тому или иному типу с указанием возраста, истории накопления промышленно интересных аккумуляций лития в земной коре и относительной роли каждого из известных типов месторождений в разные геологические эпохи [Ткачев и др., 2018; Месторождения стратегических ..., 2020]. На государственном балансе России находится 17 месторождений. Однако расположение сырьевых объектов в экономически неосвоенных районах, комплексность месторождений и, как результат, сложность технологических схем обогащения обуславливают низкую экономическую эффективность их эксплуатации и фактически делают основную часть балансовых запасов лития неактивными. Единственное разрабатывавшееся в Читинской области на литий Завитинское месторождение в настоящее время законсервировано. Другие месторождения лития в России не эксплуатируются. Потребности российских заводов в литиевом сырье и главных потребляемых продуктах — карбонате и гидроксиде лития полностью удовлетворяются за счет импорта из Чили и Китая.

По производству концентрата Li₂CO₃ первое место занимает Австралия, получая порядка 40% его общего объема из литийсодержащих пегматитовых руд, второе (33%) и третье места (16%) занимают Чили и Аргентина, предприятия которых используют гидроминеральное сырье. Производство концентрата в пересчете на чистый металл в 2017 г. на рудных объектах составило 18.3 тыс. т (Австралия), на гидроминеральных — 20 тыс. т (Чили и Аргентина) [Курков и др., 2018; U. S. Geological ..., 2019].

Ресурсы и запасы лития

Сосредоточение эндогенных запасов лития имеет место в редкометалльных пегматитах, а основная масса экзогенных мировых запасов связана с природными высокоминерализованными

ми водами [Месторождения стратегических ..., 2020]. Извлекаемые запасы Li_2O в мире составляют 14.5 млн. т в год [U. S. Geological ..., 2019], при этом подавляющая часть подтвержденных запасов (78%) учитывается в литийсодержащей рапе соляных озер. С редкометальными пегматитами связано около 23% запасов лития. Лидером по запасам литиевого сырья является Чили, где сосредоточено 52% запасов лития, представленных наиболее дешевыми для освоения гидроминеральными месторождениями. На втором месте — Китай, минерально-сырьевая база (22.1%) которого представлена рудным пегматитовым и гидроминеральным сырьем, на третьем месте — гидроминеральные месторождения Аргентины (13.8%) и на четвертом — пегматиты Австралии (11%).

В настоящее время за рубежом до 60–70% лития производится за счет эксплуатации рапы бессточных соляных озер с содержаниями 0.06–0.5 мас. % Li_2O [Зими́на и др., 2014]. Запасы и прогнозные ресурсы диоксида лития в гидроминеральных объектах имеют существенно меньшие масштабы и низкие содержания полезного компонента, однако технологии добычи и получения концентрата Li_2CO_3 и LiOH из них значительно экономичнее по сравнению с месторождениями других типов. Так, например, в последние годы все большее значение приобретают месторождения осадочного типа и подземные минерализованные воды. Например, из рапы озера Сирле (США) при содержаниях ~0.02 мас. % LiCl добывается около 3% мирового литиевого сырья. В перечне ведущих объектов саларного типа следует отметить эффективно осваиваемое месторождение Атакама (Чили) и подготавливаемое к разработке крупное месторождение Уюни (Боливия). Таким образом, на смену традиционным рудным видам сырья приходят рассолы, попутные нефтяные воды, литийсодержащие глины, так как более 70% разведанных запасов лития сосредоточено именно в этих источниках.

Россия обладает очень крупными запасами лития. Около 75% балансовых запасов приходится на сподуменовые пегматиты месторождений Мурманской, Иркутской и Читинской областей, остальное — на месторождения с попутным литием: редкометальные граниты с литиевыми слюдами и слюдисто-флюоритовые метасоматиты.

Эпохи накопления лития

Месторождения лития мира в рамках концепции тектоники плит приурочены к эпохам,

определяемым циклами Уилсона в ходе эволюции земной коры, приводящими к созданию предполагаемых новых суперконтинентов — Кенорания, Колумбия, Родиния, Пангея [Месторождения стратегических ..., 2020].

В *кенорском цикле*, охватывающем значительную часть архея, преобладают месторождения пегматитового типа. Самые ранние по возрасту — альбит-сподуменовые редкометальные пегматиты комплекса Древних Гнейсов Свазиленда и гранит-зеленокаменного пояса Барбертон кратона Каапваль. Они отличаются малой продуктивностью. Пегматиты с рудами промышленного уровня появились позже, уже в конце мезоархея. Они представлены объектами кратона Палабора — Пилгангура и Воджина.

Неоархейские месторождения лития более многочисленны, чем мезоархейские, а география распространения гораздо шире. Наибольшее их количество выявлено в гранит-зеленокаменно-ланцевых поясах кратонов Йилгарн (Гринбушес, Эрл-Грей, Маунт-Марион) и Сьюпериор (Танко, Лакорн, Джеймс-Бэй). Также они установлены в аналогичных по природе поясах на кратонах Слейв (Йеллоунайф-Болью), Зимбабве (Бикита, Аркадия, Зулу) и Кольском (Колмозерское, Полмостундровское).

Основным рудным минералом является сподумен, но в промышленных рудах могут превалировать и другие минералы лития: амблигонит (Танко, Бикита), лепидолит (Бикита), петалит (Бикита, Зулу, Аркадия), эвкриптит (Бикита). Месторождение Сепарейшн-Рэпидз — редкий пример месторождения лития, в котором сподумен не предполагается извлекать в отдельный концентрат: только петалит и, вероятно, лепидолит.

Колумбийский цикл охватывает значительную часть протерозоя и также представлен только пегматитовым типом. Его представители с превалярованием сподумена в рудах известны в складчатых поясах среднего палеопротерозоя Риу-дас-Мортес (Вольта-Гранде), Эбурнейском (Гуламина, Бугуни) и Кировоградском (Полоховское, Надия Станковатское), а также в поясах Восточно-Саянском (Гольцовое, Вишняковское), Свекофеннском (Рапасаарет-Оутовеси) и Пайн-Крик позднего палеопротерозоя. На месторождениях Украинского щита практическое значение имеет петалит. Из рудных объектов цикла эксплуатируются руды только на Вольта-Гранде, на остальных проводится разведочное бурение (месторождения в орогенных поясах Эбурнейский, Свекофеннский и Пайн-Крик).

Родинийский цикл также заключен в рамках протерозоя, не отличаясь от двух предыдущих по типам месторождений лития. В его границах выявлены два объекта пегматитового типа в гренвиллидах юга Центральной Африки: Маноно-Китотоло в Кибарском поясе и Камативи в активизированном в конце мезопротерозоя кристаллическом массиве Дете-Камативи. В месторождениях цикла основной практический интерес представляет сподумен.

Пангейский цикл охватывает палеозой и низы мезозоя и, в отличие от предыдущих циклов, представлен всеми перечисленными выше типами. В нем преобладают пегматитовые объекты, наиболее значительные из которых установлены в Аппалачском поясе (Кингс-Маунтин) и поясе Сонпань-Ганьцзы, включая его северо-западное продолжение в Кунь-Луне (Цзяцзика, Байлуншань). Кроме того, они известны в орогенных поясах: Арасуай (Такуарал), Иберийском сегменте Герцинского (Сепеда), Алтайском (Коктогай), и Тува-Монгольском (Тастыгское) сегментах Урало-Монгольского (Центрально-Азиатского) и палеозоидах Альпийского (Вайнебене). Только в Сепеда главный концентратор лития — петалит, в остальных — сподумен, в Коктогае заметная роль принадлежит лепидолиту.

Амазийский цикл ведет свое начало с мезозоя и представлен саларным и кальдерным типами месторождений лития. Все месторождения и проявления кальдерного типа имеют значительное сходство в условиях залегания руд: краевые зоны субаэральных вулканических кальдер, наличие богатых литием онтогонитовых пород, включая их туфогенные и туфогенно-осадочные разновидности, и стратоидная морфология рудных тел. Разделяются на четыре подтипа.

Углеродистый подтип представлен месторождением Шавазсай пангейского цикла. Оно единственное связано с постколлизийным, а не с синаккреционным магматизмом, имеет специфический состав руд, как по концентраторам лития, так и по природе вмещающего субстрата. **Глинистый подтип** в амазийском цикле выявлен в миоценовых палеокальдерах надсубдукционных окраинно-континентальных поясов. На севере провинции Бассейнов и Хребтов в кальдере Мак-Дермитт оценены месторождения Такер-Пасс и Кингс-Вэлли-Саут, на юге — Лавентана-Эльсаус. Они объединяются локализацией в туфогенных глинах, накопившихся в перикальдерных озерах, а также связью лития с глинистыми минералами типа иллита и монтмориллонита, и в гораз-

до меньшей степени — с гекторитом, слюдами и слабо измененными пепловыми частицами. **Пепловый подтип** установлен в Андийском поясе в месторождении Фальчани, связанного с неизменными ни эпитегрмальными, ни гипергенными процессами слоями пепловых туфов. Весь литий сосредоточен в вулканическом стекле пепловых частиц. **Ядаритовый подтип** выявлен в Балканском поясе в межгорной депрессии Ядар и предстало одноименным месторождением среди озерных вулканогенно-осадочных пород. Литий в рудах сконцентрирован в ядарите — боросиликате, который и был здесь открыт при осуществлении проекта, изначально ориентированного на оценку боратовой минерализации. Литиевые руды залегают в туфогенных песчаниках и алевролитах, переслаивающихся со слоями боратов.

Генезис месторождений кальдерного типа пока еще слабо изучен. Наиболее аргументированная модель описывает месторождение Такер-Пасс в палеокальдере Мак-Дермитт. Здесь литиевая минерализация возникла в туфогенно-осадочных породах в период их литификации на стадии раннего диагенеза в процессе внутрислойной циркуляции термальных растворов, возникших при смешении постмагматических и метеорных вод. Эта модель не противоречит геологическим данным, известным для месторождений всех других подтипов кальдерного типа, кроме пеплового. Последний, очевидно, возник при прямом накоплении литиеносных пепловых туфов после вулканических извержений.

Значимые пегматитовые месторождения лития в амазийском цикле известны только в двух металлогенических поясах: Забайкальском (Завитинское) и Гиндукушском (Парун). Главный концентратор лития в них — сподумен. Несмотря на многочисленные проявления гранитного типа в мезозое — кайнозое, он внес наименьший вклад в ресурсный потенциал лития в амазийском цикле. Это крупнейшее в мире месторождение лепидолитовых руд Ичунь в Южно-Китайском поясе и крупное месторождение амблигонитовых (с лепидолитом) руд Кестер в Верхоянском поясе. Реальный вклад в мировое производство лития рудных месторождений амазийского цикла вносят салары. Их распределение по континентам мира, по данным Британской геологической службы, приведено в работе [Bradley et al., 2013].

Таким образом, накопление ресурсов лития происходило с позднего мезоархея до голоцена, процесс имел дискретный импульсный харак-

тер [Ткачев и др., 2018]. Все импульсы тяготеют к периодам интенсификации орогенных процессов в глобальном масштабе, что характерно для тектонических фаз активного формирования суперконтинентов. В самых ранних суперконтинентальных циклах — кенорском, колумбийском, родинийском — возникали месторождения лития только пегматитового типа. Этот тип является единственным сквозным в геологической истории. Его максимальное количество месторождений, ресурсы и наиболее высокие средние содержания лития установлены для кенорского цикла, что позволило предположить существование в архее особо благоприятных условий для возникновения продуктивных на литий пегматитов. Этот тип также основной в пангейском цикле, но небольшая часть ресурсов связана с Li-F гранитами. Значение месторождений гранитного и кальдерного типов в ресурсной базе лития пока намного превосходит их реальную роль в добыче этого вида сырья. Однако высокий интерес к выявлению и оценке таких объектов со стороны геологоразведочных и горно-добывающих организаций во многих странах мира, указывают на вероятное изменение этой ситуации в ближайшем будущем. Текущий амазийский цикл наиболее разнообразен в типах месторождений лития: рассолы в саларах наиболее важны, а эпитермальные стратиформные залежи, пегматиты и Li-F граниты имеют меньшее значение.

Распределение лития в породах рифея Южного Урала

На Южном Урале в детальных работах, посвященных изучению геохимического поведения большинства микроэлементов в песчаниках, сланцах, известняках и доломитах [Гареев, 1989; Анфимов, 1997; Маслов и др., 2001] или тонкозернистых терригенных рифейских породах [Маслов и др., 2008] Башкирского мегантиклинория, сведения по содержанию Li в породах не рассматриваются. Отчасти это связано с тем, что большинство исследований прошлого столетия по поведению редких элементов в породах рифея Южного Урала выполнены спектральным приближенно-количественным методом, либо для решения исследовательских задач изучение лития не было актуальным. Сравнение, проведенное в работе Т. И. Широковой [1992], показывает, что указанный метод примерно в 1.5–2 раза занижает концентрации лития в различных типах пород по сравнению с количественным определением этого элемента пламенно-эмиссионным

анализом. В настоящем исследовании используются результаты определения Li в породах различных литологических типов в разновозрастных свитах от нижнего до верхнего рифея Башкирского мегантиклинория, полученные методами с индуктивно-связанной плазмой с масспектрометрическим [Маслов и др., 2013а, 2013б; Ковалев и др., 2013] и атомно-эмиссионным [Мичурин и др., 2020, 2021, 2022] окончанием, а также количественным пламенно-эмиссионным методом [Широкова, 1992]. Все перечисленные опубликованные данные по разновозрастным рифейским осадочным (песчаники, глинистые сланцы, карбонаты) и магматическим породам в различных комплексах сведены в таблицы 2 и 3.

Данные, указанные в таблице 2, графически представлены на рис. 1. Его рассмотрение показывает, что в отложениях рифея Башкирского мегантиклинория выделяются два стратиграфических интервала — суранская и авзянская свиты соответственно нижнего и среднего рифея, в которых преимущественно карбонатные породы значительно обогащены литием в 5.1–7.6 раз по сравнению с кларком этого щелочного элемента для карбонатов (5 г/т по К. Таркьяну и К. Ведеполу [Войткевич и др., 1990], см. табл. 1). Фиксируются также повышенные концентрации Li в песчаниках зигазино-комаровской (2.4 раза) и в глинистых сланцах кужинской (1.7 раз) свит среднего рифея относительно кларка лития, приведенного в табл. 1 для этих пород. Нижняя часть кужинской свиты сопоставляется [Ларионов, 1994] с верхней частью зигазино-комаровской свиты, а верхняя часть кужинских отложений — с нижней каташкинской подсвитой авзянской свиты среднего рифея и считаются их фаціальными аналогами.

Вместе с тем, отметим, что для песчаников зигазино-комаровской свиты, как и для глинистых сланцев авзянской свиты (см. табл. 2), в работе [Ковалев и др., 2013] приводится только разброс полученных значений и не указывается количество измеренных образцов. В этих случаях с кларковым содержанием нами сравнивалось среднее значение установленных вариаций, что является не совсем корректным для понимания реальной картины распределения лития в рифейских породах Башкирского мегантиклинория. В целом, учитывая общую мощность рифейских отложений свыше 12 км и площадь их распространения в мегантиклинории около 15 000–20 000 км² [Маслов и др., 2001], для него стоит отметить дефицит аналитических данных и незначительное количе-

ство проанализированных образцов в различных свитах. Для всех типов осадочных пород (песчаники, глинистые сланцы, карбонатные породы), встречающихся в различных свитах от нижнего до верхнего рифея, представительные аналитические результаты получены только примерно в 400 образцах. Особенно это касается магматических пород, в которых рассматриваются лишь 34 образца и обогащение литием по сравнению с кларком для них (см. табл. 1) фиксируется только в единичных образцах навыйского, лапыштинского и шуйдинского комплексов (см. табл. 3). С учетом отсутствия надежных геохронологических данных по последним двум комплексам, а также того, что в табл. 3 практически нет данных по одним из наиболее распространенных комплексов (повальненский, инзерский, юрматинский), правильно оценить имеющиеся результаты о распределении лития в магматических породах Башкирского мегантиклинория в настоящее время не представляется возможным.

Литий в карбонатных породах суранской свиты содержится, вероятнее всего, во флогопите. На это указывает значительное присутствие в них F-содержащего флогопита и самые высокие положительные геохимические связи между F и Li ($K_{корр} = 0.97$), а также между F и Rb ($K_{корр} = 0.93$) [Мичурин и др., 2020]. В работе [Широбокова, 1992] также считается, что литий породах Кужинского рудного поля находится в слюдах. В доказательство этого указанный автор также приводит высокую положительную корреляцию между F и Li (рис. 2, а).

В целом в магматических комплексах Башкирского мегантиклинория фиксируется преимущественно прямая связь лития с рубидием, что, вероятнее всего, следует рассматривать как вхождение Li в аннит, который в основных интрузивных и эффузивных породах чаще всего содержит этот элемент в сравнительно высоких концентрациях (см. рис. 2, б). Вместе с тем можно обратить внимание, что на рис. 2 б один из образцов Шуйдинского комплекса отклоняется от этой зависимости и содержит больше всего Li. По нашему мнению, это указывает на возможное присутствие в габбродолеритах Шуйдинского комплекса собственных минералов лития.

Данные табл. 2 согласуются с результатами А. А. Макушина с соавторами [Бигнов и др., 2001]. В околорудном ореоле селлаит-флюоритового месторождения Суран-1, локализованного в карбонатно-терригенных отложениях суранской свиты, ими установлены повышенные концен-

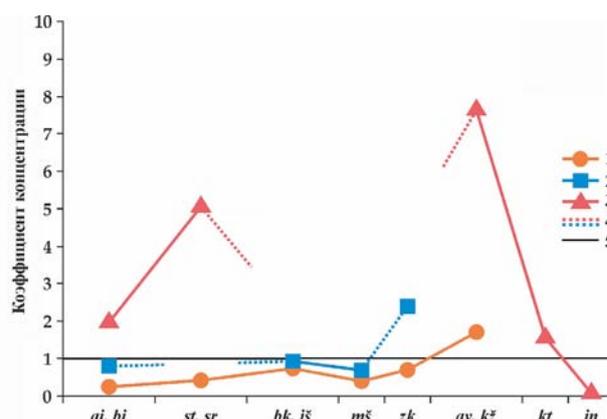


Рис. 1. Изменение коэффициентов концентрации лития в осадочных породах разновозрастных свит Башкирского мегантиклинория (среднее содержание в литологическом типе породы/кларк породы по К. Таркьяну и К. Ведеполу [Войткевич и др., 1990])

Условные обозначения: 1 – глинистые сланцы; 2 – песчаники; 3 – карбонатные породы; 4 – предполагаемые интервалы вследствие отсутствия или малого количества аналитических данных; 5 – линия кларкового содержания. Нижнерифейские свиты стратотипических разрезов: *ai* – айская, *st* – саткинская, *bk* – бакальская. Соответственно, их стратиграфические аналоги: *bi* – большеинзерская, *sr* – суранская, *js* – юшинская. Среднерифейские свиты стратотипических разрезов: *ms* – машакская, *zk* – зигазино-комаровская, *av* – авзянская. Стратиграфический аналог авзянской свиты: *kz* – кужинская. Верхнерифейские свиты стратотипических разрезов: *kt* – катавская, *in* – инзерская.

Fig. 1. Changes in lithium concentration coefficients in sedimentary rocks of formations of different ages in the Bashkirian meganticlinorium (average content in the lithological type of rock/clark rock according to K. Turekian and K. Wedepohl [Voitkevich et al., 1990])

Legend: 1 – clayey shales; 2 – sandstones; 3 – carbonate rocks; 4 – estimated intervals due to the absence or small amount of analytical data; 5 – line of clarke content. Lower Riphean formations of stratotype sections: *ai* – Ai, *st* – Satka, *bk* – Bakal. Accordingly, their stratigraphic analogues: *bi* – Bolsheiner, *sr* – Suran, *js* – Yusha. Middle Riphean formations of stratotype sections: *ms* – Mashak, *zk* – Zigazino-Komarovo, *av* – Avzyan. Stratigraphic analogue of the Avzyan formation: *kz* – Kuzha. Upper Riphean formations of stratotype sections: *kt* – Katav, *in* – Inzer.

трации лития. В строении ореола важную роль играют фториды из группы криолита: усовит ($Ba_2MgAl_2F_{12}$), пахнолит ($NaCaAlF_6 \cdot xH_2O$) и, особенно, криолитионит ($NaLi_3 [AlF_6]_2$). По данным спектрального анализа содержание оксида лития в керне скв. 144 достигает рудного уровня 0.1 мас. %. Дифрактометрическими исследованиями (Унипромедь, г. Екатеринбург) выявлено наличие литийсодержащих минералов в 11 скважинах [Бигнов и др., 2001]. Основным минералом, содержащим литий, является криолитионит, массовая доля которого составляет 0.1–7%. Закономерностей

Таблица 2 Среднее, минимальное и максимальное содержание лития в осадочных породах рифея Башкирского мегантиклинория
Table 2 The average, minimum and maximum lithium content in sedimentary rocks of the Riphean Bashkirian meganticlinorium

Свиты/толщи	Песчаники	Глинистые сланцы	Карбонаты
Верхний рифей			
Инзерская	—	—	<u>0.4±0.5</u> 0.0–1.1 (10)
Катавская	—	—	<u>8.1</u> (9)
Средний рифей			
Кужинская	—	<u>128</u> 50–250 (6)	<u>38</u> 3–120 (8)
Авзянская	—	3.2–182.3	—
Зигазино-комаровская	20.4–51.0	<u>44.1±26.9</u> 20.8–113.5	—
Машакская	<u>10.3±11.9</u> 0.7–40.0 (34)	<u>24.6±13.3</u> 3.0–40.0 (34)	—
Нижний рифей			
Юшинская	<u>14.0±6.9</u> 2.4–30.4	<u>51.3±20.8</u> 15.3–81.7	—
Бакальская	—	<u>46.0±21.4</u> 6.0–94.3 (22)	—
Суранская	—	<u>20.3±5.9</u> 4.3–26.1	<u>25.5±28.8</u> 0.0–98.2 (25)
Саткинская	—	<u>34.6±17.6</u> 3.3–75.5 (22)	—
Большеинзерская	<u>17.6±20.5</u> 2.7–72.7	<u>58.9±24.7</u> 8.0–103.4	9.8 (1)
Айская	<u>6.4±4.8</u> 1.2–14.2	<u>26.6±8.7</u> 16.9–56.1	—

Примечание. Использованы данные из работ [Широбоква, 1992; Маслов и др., 2013а, 2013б; Ковалев и др., 2013; Мичурин и др., 2020, 2021, 2022]. В скобках – количество проанализированных образцов. Прочерк – нет данных. Полуужирным шрифтом показаны средние значения и стандартное отклонение.

Note. Data from works [Shirobokova, 1992; Maslov et al., 2013a, 2013b; Kovalev et al., 2013; Michurin et al., 2020, 2021, 2022]. In parentheses is the number of samples analyzed. Dash – no data. The average values and standard deviation are shown in bold.

Таблица 3 Среднее, минимальное и максимальное содержания лития в магматических комплексах рифея Башкирского мегантиклинория
Table 3 The average, minimum and maximum lithium content in igneous complexes of the Riphean Bashkirian meganticlinorium

Комплекс	Состав пород	Возраст, млн лет	Количество образцов	Содержание
Повальненский, Кургасский	основные	~1128...~1004, ~1380...~1318	6	16.0±5.9 9.8–26.3
Лапыштинский	ультраосновные	RF ₂	1	3.1
Лапыштинский	основные	RF ₂	2	32.0±19.3 18.3–45.6
Шатакский	основные	~1380	3	12.3±3.1 9.1–15.3
Шатакский	кислые	~1380	1	5.5
Кусинско-Копанский	основные	~1395...~1353	5	9.0±5.4 1.1–14.7
Кусинско-Копанский	кислые	~1395...~1353	1	6.7
Шуйдинский	основные	RF ₁	2	86.3±83.5 27.3–145.4
Шуйдинский	ультраосновные	RF ₁	1	42.5
Юшинский	основные	RF ₁	7	14.4±8.6 3.1–30.4
Навышский	основные	~1750 и ~450	5	34.8±11.9 21.7–54.4

Примечание. Использованы данные из работ [Холоднов др., 2012; Ковалев и др., 2013; Краснобаев и др., 2020; Khotylev et al., 2020]. Полу жирным шрифтом показаны средние значения и стандартное отклонение.
 Note. Data from the works [Kholodnov et al., 2012; Kovalev et al., 2013; Krasnobaev et al., 2020; Khotylev et al., 2020]. The average values and standard deviation are shown in bold.

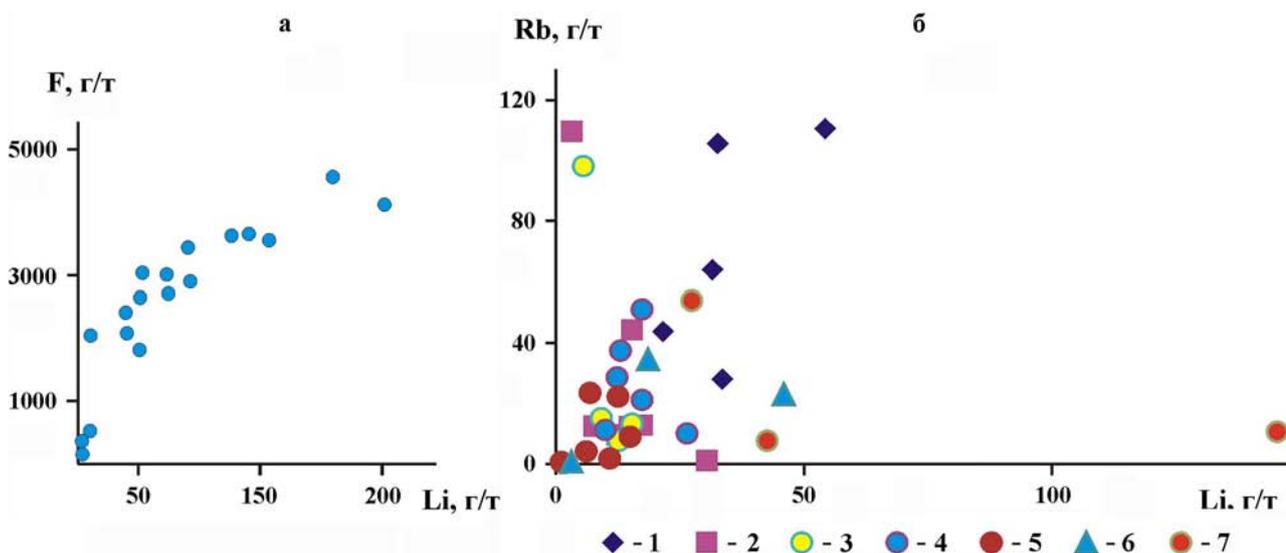


Рис. 2. Связи F с Li во вмещающих породах Кузгинского месторождения (а) (по [Широбокова, 1992]) и Rb с Li в магматических комплексах Башкирского мегантиклинория (б)

Условные обозначения: Магматические комплексы: 1 – Навышский; 2 – Юшинский; 3 – Шатакский; 4 – нерасчлененные Повальненский, Кургасский; 5 – Кусинско-Копанский; 6 – Лапыштинский; 7 – Шуйдинский.

Fig. 2. Relationships between F and Li in the host rocks of the Kuzha deposit (a) (according to [Shirobokova, 1992]) and Rb with Li in the igneous complexes of the Bashkirian meganticlinorium (б)

Legend: Igneous complexes: 1 – Navysh; 2 – Yusha; 3 – Shata; 4 – undivided Povalnensk, Kurgassk; 5 – Kusinsko-Kopansk; 6 – Lapsytinsk; 7 – Shuydinsk.

в распределении лития в разрезе и на площади месторождения не обнаружено [Бигнов и др., 2001]. В то же время изучение различных геохимических особенностей флюоритов [Маслов и др., 2001], показало, что ранние генерации серых и фиолетовых флюоритов отлагались из обогащенных фтором эвапоритовых рассолов, а зеленые флюориты, метасоматически замещающие ранние генерации флюорита и селлаит, имели другой источник фтора, предположительно связанный с гранитоидами. Возможно, именно с этим источником связаны повышенные концентрации лития в месторождении.

Заключение

Литий — очень важный для инновационной экономики вид минерального сырья, использование которого в мире постоянно растет вместе с развитием целого ряда современных отраслей промышленности. Накопление ресурсов лития происходило с позднего мезоархея до голоцена. Процесс имел дискретный характер. В самых ранних суперконтинентальных циклах — кенорском, колумбийском и родинийском — возникали месторождения лития только пегматитового типа. Этот тип также основной в пангейском цикле, но небольшая часть ресурсов связана с Li-F гранитами. Текущий амазийский цикл наиболее разнообразен в типах месторождений лития: рассолы в сalaraх наиболее важны, а эпitherмальные стратиформные залежи, пегматиты и Li-F граниты имеют меньшее значение.

Россия обладает крупными запасами лития, однако расположение сырьевых объектов в экономически неосвоенных районах, комплексность месторождений и, как результат, сложность технологических схем обогащения обуславливают низкую экономическую эффективность их эксплуатации и фактически делают основную часть балансовых запасов лития неактивными.

Приведенные материалы показывают, что рифейские отложения Башкирского мегантиклинория могут быть перспективны на обнаружение повышенных концентраций лития. Выделяются два стратиграфических интервала обогащения пород литием: нижне- и среднерифейский. Первый из них связан с отложениями суранской, второй — авзянской (кужинской) свит. Слабая изученность геохимии лития в рифейских породах Южного Урала диктует проведение дальнейших геологических и геохимических исследований в этом направлении.

Список литературы

Анфимов Л. В. Литогенез в рифейских осадочных толщах Башкирского мегантиклинория (Ю. Урал). Екатеринбург: УрО РАН. 1997. 290 с.

Бигнов Р. М., Макушин А. А., Казаков И. И., Чебан С. Г. Роль глубинной структуры в размещении нефтегазовых, рудных месторождений и новых перспективных зон Республики Башкортостан // Геология и перспективы расширения сырьевой базы Башкортостана и сопредельных территорий. Мат-лы IV Республ. геол. конф. Т. 2. Уфа: ИГ УНЦ РАН, 2001. С. 3–26.

Борисенко Л. Ф., Бурков В. В., Капустин Ю. Л., Минеев Д. А., Овчинников Л. Н., Солодов Н. А., Субботин К. Д., Челищев Н. Ф. Месторождения литофильных редких металлов. М.: Недра. 1980. 559 с.

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.

Булах А. Г., Золотарёв А. А., Кривовичев В. Г. Структура, изоморфизм, формулы, классификация минералов. СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. ун-та, 2014. 132 с.

Войткевич Г. В., Кокин А. В., Мирошников А. Е., Прохоров В. Г. Справочник по геохимии. М.: Недра, 1990. 480 с.

Гареев Э. З. Геохимия осадочных пород стратотипического разреза рифея. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ГЕОХИ, 1989. 23 с.

Загорский В. Е., Владимиров А. Г., Макагон В. М., Кузнецова Л. Г., Смирнов С. З., Дьячков Б. А., Анникова И. Ю., Шокальский С. П., Уваров А. Н. Крупные поля сподуменовых пегматитов в обстановках рифтогенеза и постколлизийных сдвигово-раздвиговых деформаций континентальной литосферы // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 2. С. 303–322.

Зимина Г. В., Потапова А. М., Смирнова И. Н. Избранные главы ХиТРЕЭ. Химия и технология лития // Учеб. пособие, М.: МИТХТ им. М. В. Ломоносова, 2014. 60 с.

Ежеквартальный бюллетень «Resources and Energy Quarterly March 2021» [Электронный ресурс] // Государственный департамент промышленности, науки, энергетики и ресурсов Австралии (Australian Government, Department of Industry, Science, Energy and Resources). — Режим доступа: <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2023-10/resources-andenergy-quarterly-september-2023.pdf>, свободный (дата обращения 02.04.2021). Загл. с экрана.

Ковалев С. Г., Высоцкий И. В., Пучков В. Н., Маслов А. В., Гареев Э. З. Геохимическая специализация структурно-вещественных комплексов Башкирского мегантиклинория. Уфа: ДизайнПресс, 2013. 268 с.

Краснобаев А. А., Пучков В. Н., Сергеева Н. Д., Бушарина С. В. Полихронные цирконы вулканитов Навышского комплекса айской свиты нижнего рифея (Южный Урал) // Георесурсы. 2020. Т. 22 (4). С. 101–112. DOI: 10.18599/grs.2020.4.101-112

Кудрявцев П. Г., Кудрявцев Н. П. Литий: ресурсы, добыча и перспективы развития мирового рынка

// Международный научный журнал. Альтернативная энергетика и экология. 2018. № 10–12. С. 70–81.

Курков А. В., Лихникевич Л. Г., Ануфриева С. И., Онтоева Т. Д., Рогожин А. А., Пермьякова Н. А. Современные технологии освоения минерально-сырьевой базы лития // Минеральное сырье. № 35. М.: ВИМС, 2018. 73 с.

Ларионов Н. Н. Геология и рудоносность авзянской терригенно-карбонатной формации среднего рифея на Южном Урале / Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1994. 19 с.

Линде Т. П., Ставров О. Д., Юшко Н. А. Литий России, состояние, перспективы освоения и развитие минерально-сырьевой базы // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. 2000. № 6. 116 с.

Маслов А. В., Гареев Э. З., Крупенин М. Т., Ковалев С. Г. Литогеохимические особенности глинистых сланцев бакальской свиты нижнего рифея Башкирского мегантиклинория: новые данные // Известия вузов. Геология и разведка. 2013а. № 2. С. 21–29.

Маслов А. В., Гареев Э. З., Крупенин М. Т., Ковалев С. Г. Литогеохимические особенности глинистых сланцев саткинской свиты нижнего рифея Башкирского мегантиклинория: новые данные // Вестник ПГУ. Геология. 2013б. № 1. С. 9–19.

Маслов А. В., Крупенин М. Т., Гареев Э. З., Анфимов Л. В. Рифей западного склона Южного Урала (классические разрезы, седименто- и литогенез, минерагения, геологические памятники природы). Том I. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2001. 351 с.

Маслов А. В., Ножкин А. Д., Подковыров В. Н., Летникова Е. Ф., Туркина О. М., Гражданкин Д. В., Дмитриева Н. В., Ишерская М. В., Крупенин М. Т., Ронкин Ю. Л., Гареев Э. З., Вещева С. В., Лепихина О. П. Геохимия тонкозернистых терригенных пород верхнего докембрия Северной Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 274 с.

Месторождения стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации: закономерности размещения, условия формирования, инновационные технологии прогноза и освоения: Научные результаты, полученные при выполнении программы № 1, 48 фундаментальных исследований Президиума РАН / гл. ред. академик РАН Н. С. Бортников; отв. сост. чл.-корр. РАН В. А. Петров. М.: ИГЕМ РАН, 2020. 317 с.

Миронов Ю. Б., Карпунин А. М., Фукс В. З. Эпохи формирования и типы месторождений лития зарубежных стран // Региональная геология и металлогения. 2022. № 92. С. 105–116.

Мичурин С. В., Биктимерова З. Р., Казбулатова Г. М., Горожанин В. М., Султанова А. Г., Карамова А. М., Войкина З. А., Шарипова А. А. Минералогические и геохимические особенности карбонатных пород нижней подсвиты инзерской свиты верхнего рифея в районе д. Толпарово (Южный Урал) // Геологический вестник. 2021. № 1. С. 80–97. DOI: 10.31084/2619–0087/2021-1-8

Мичурин С. В., Султанова А. Г., Казбулатова Г. М., Шарипова А. А., Савельев Д. Е., Горожанин В. М., Карамова А. М., Войкина З. А. Фтор и хлор в карбонатных породах лапыштинской подсвиты суранской свиты нижнего рифея

(Багарыштинский разрез, Южный Урал) // Геологический вестник. 2020. № 3. С. 3–26. DOI: 10.31084/2619–0087/2020-3-1

Мичурин С. В., Шарипова А. А., Казбулатова Г. М., Юлдайбаева В. Ф. Минералогические и геохимические особенности известняков катавской свиты Акташской площади (Ямантауский антиклинорий, Южный Урал) // Геологический вестник. 2022. № 1. С. 83–93. DOI: 10.31084/2619–0087/2022-1-7

Султанова А. Г. Некоторые вопросы геохимии лития // Геология, полезные ископаемые и проблемы геозологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: Материалы / 15-я Межрегиональная научно-практическая конференция, Уфа, 14–17 мая 2024 г. М.: Издательство «Перо», 2024. С. 220–225.

Ткачев А. В., Рундквист Д. В., Вишневецкая Н. А. Эволюционные аспекты металлогении лития: эпохи накопления, типы месторождений и их особенности // Разведка и охрана недр. 2018. № 9. С. 10–18.

Толкушкина Е. А., Торикова М. В., Комин М. Ф. Минерально-сырьевая база лития: проблемы развития и использования // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2012. № 2. С. 2–8.

Холоднов В. В., Бочарникова Т. Д., Шагалов Е. С. Состав, возраст и генезис магнетит-ильменитовых руд среднерифейского стратифицированного Медведевского массива (Кусинско-Копанский комплекс Южного Урала) // Литосфера. 2012. Т. 5. С. 145–165.

Широбокова Т. И. Стратиформное полиметаллическое и баритовое оруденение Урала. Свердловск, УрО АН СССР, 1992. 143 с.

Bradley D., Munk L.-A., Jochens H., Hynek S., Labay K. A Preliminary Deposit Model for Lithium Brines / USGS Open-File Report. 2013. 9 p.

Brigatti M. F., Lugli C., Poppi L., Foord E. E., Kile D. E. Crystal chemical variations in Li- and Fe-rich micas from Pikes Peak batholiths (central Colorado) // American Mineralogist. 2000. V. 85. P. 1275–1286.

Khotylev A. O., Tevelev A. V., Bychkova Ya. V., Latyshev A. V., Anosova M. B. Mezoproterozoic basite magmatism of the Bashkirian meganticlinorium (Southern Urals): age constraints, petrological and geochemical features // Geodynamics & Tectonophysics. 2020. V. 11 (2). P. 219–243. DOI: 10.5800/GT-2020-11-2-0471

Ktalkherman M. G., Emelkin V. A., Pozdnyakov B. A. Production of lithium oxide by decomposition lithium carbonate in the flow of a heat carrier // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2009. V. 43, № 1. P. 88–93.

U. S. Geological Survey, 2019. Mineral commodity summaries 2019: U. S. Geological Survey, 200 p. <https://doi.org/10.3133/70202434>

Nicholson P. Past and future development of the market for lithium in the World aluminium industry // Energy. 1978. V. 3, № 3. P. 243–246.

Lindagato P., Li Y., Macháček, J., Yang G., Mungwarakarama I., Ndahimana A., Ntwali H. P. K. Lithium Metal: The Key to Green Transportation // Appl. Sci.. 2023. V. 13. 405. <https://doi.org/10.3390/app13010405>

Sheets J. New lithium market // *Ceramic Engineering and Science Proceedings*. 2000. V. 21, № 5. P. 97–99.

Szlugaj J., Radwanek-Bak B. Lithium sources and their current use // *Gospodarka surowcami mineralnymi — mineral resources management*. 2022. V. 38, № 1. P. 61–88. DOI: 10.24425/gsm.2022.140613

References

Anfimov L. V. (1997) *Litogenez v rifeiskikh osadochnykh tolshchakh Bashkirskogo megantiklinoriya (Yu. Ural)* [Lithogenesis in the Riphean sedimentary strata of the Bashkir meganticlinorium (South Ural)]. UrO RAN Publ., Ekaterinburg, 290 p. (In Russian).

Bignov P. M., Makushin A. A., Kazakov I. I., CHEBAN S. G. (2001) Rol' glubinoj struktury v razmeshchenii neftegazovyh, rudnyh mestorozhdenij i novyh perspektivnyh zon Respubliki Bashkortostan [The role of the deep structure in the placement of oil and gas, ore deposits and new promising zones of the Republic of Bashkortostan]. *Geology and prospects for expanding the raw material base of Bashkortostan and adjacent territories*. Mat-ly IV Respubl. geol. konf. (2). Ufa: IG UNC RAN, 3–26. (In Russian).

Borisenko L. F., Burkov V. V., Kapustin Ju. L., Mineev D. A., Ovchinnikov L. N., Solodov N. A., Subbotin K. D., Chelishhev N. F. (1980) *Mestorozhdenija litofil'nyh redkih metallov* [Deposits of lithophile rare metals]. Moscow: Nedra, 559 p. (In Russian).

Boyarko G. YU., Hat'kov V. YU., Tkacheva E. V. (2022) Syr'evoj potencial litiya Rossii [Resource potential of lithium in Russia]. *News of Tomsk Polytechnic University. Inzhiniring georesursov*. 333 (12), 7–16. (In Russian).

Bulah A. G., Zolotaryov A. A., Krivovichev V. G. (2014) *Struktura, izomorfizm, formuly, klassifikaciya mineralov* [Structure, isomorphism, formulas, classification of minerals]. SPb.: Izd-vo S.-Peterburg. un-ta., 132 p. (In Russian).

Vojtkевич G. V., Kokin A. V., Miroshnikov A. E., Prohorov V. G. (1990) *Spravochnik po geohimii* [Handbook of Geochemistry]. Moscow: Nedra Publ., Russia, 476 p. (In Russian).

Gareev E. Z. (1989) *Geoximiya osadochnyx porod stratotipicheskogo razreza rifeya*. Avtoreferat Dis. Kand. Nauk [Geochemistry of sedimentary rocks of the stratotypic Riphean section. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 23 p. (In Russian).

Zagorskij V. E., Vladimirov A. G., Makagon V. M., Kuznecova L. G., Smirnov S. Z., D'jachkov B. A., Annikova I. Ju., Shokal'skij S. P., Uvarov A. N. (2014) Krupnye polja spodumennyh pegmatitov v obstanovkah riftogeneza i postkolizionnyh sdvigoovorazdvigovyh deformacij kontinental'noj litosfery [Large fields of spodumene pegmatites in settings of rifting and post-collision strike-slip deformations of the continental lithosphere]. *Geology and Geophysics*, 55 (2), 303–322. (In Russian).

Zimina G. V., Potapova A. M., Smirnova I. N. (2014) *Izbrannye glavy HiTRRE. Himiya i tekhnologiya litiya* [Selected chapters of HiTRRE. Lithium chemistry and technology]. Ucheb. posobie, M.: MITHT im. M. V. Lomonosova, 60 p. (In Russian).

Ezhekvartal'nyj byulleten' «Resources and Energy Quarterly March 2021» [Elektronnyj resurs]. Gosudarstvennyj departament promyshlennosti, nauki, energetiki i resursov Avstralii (Australian Government, Department of Industry, Science, Energy and Resources). — Rezhim dostupa: <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2023-10/resources-and-energy-quarterly-september-2023.pdf>, svobodnyj (data obrashcheniya 02.04.2021). Zagl. s ekrana. (In Russian).

Kovalev S. G., Vysotsky I. V., Puchkov V. N., Maslov A. V., Gareev E. Z. (2013) *Geokhimicheskaya spetsializatsiya strukturovoshchestvennykh kompleksov Bashkirskogo megantiklinoriya* [Geochemical specialization of structural-material complexes of the Bashkir meganticlinorium]. DizainPress Publ., Ufa, 268 p. (In Russian).

Krasnobaev A. A., Puchkov V. N., Sergeeva N. D., Busharina S. V. Polikhronnye tsirkony vulkanitov Navyshskogo kompleksa aiskoi svity nizhnego rifeya (Yuzhnyi Ural) [Polychronic zircons from volcanic rocks of the Navysh complex of the Lower Riphean Ai Formation (Southern Urals)]. *Georesursy*. 2020. 22 (4), 101–112 DOI: 10.18599/grs.2020.4.101–112 (In Russian).

Kudrjavcev P. G., Kudrjavcev N. P. (2018) Litij: resursy, dobycha i perspektivy razvitija mirovogo rynka [Lithium: resources, production and prospects for the development of the global market]. *International scientific journal. Alternative energy and ecology*, (10–12), 70–81. (In Russian).

Kurkov A. V., Lihnikovich L. G., Anufrieva S. I., Ontoeva T. D., Rogozhin A. A., Permyakova N. A. (2018) Sovremennye tekhnologii osvoeniya mineral'no-syr'evoj bazy litiya [Modern technologies for developing the lithium mineral resource base]. *Mineral raw materials*. M.: VIMS. (35), 73. (In Russian).

Larionov N. N. (1994) *Geologiya i rudonosnost' avzyanskoj terrigenno-karbonatnoj formacii srednego rifeya na Yuzhnom Urals* [Geology and ore potential of the Avzyan terrigenous-carbonate formation of the Middle Riphean in the Southern Urals]. Avtoref... dis. kand. geol.-min. nauk. Ekaterinburg: IGG UrO RAN. 19 p. (In Russian).

Linde T. P., Stavrov O. D., Jushko N. A. (2000) Litij Rossii, sostojanie, perspektivy osvoeniya i razvitie mineral'no-syr'evoj ba-zy [Lithium in Russia, state, prospects for development and development of the mineral resource base]. *Mineral raw materials. Geological-economic series*. (6), 116 p.

Maslov A. V., Gareev E. Z., Krupenin M. T., Kovalev S. G. (2013a) Litogeohimicheskie osobennosti glinistykh slancev bakal'skoj svity nizhnego rifeya Bashkirskogo megantiklinoriya: novye dannye [Lithochemical features of clayey shales of the Bakal Formation of the Lower Riphean of the Bashkir meganticlinorium: new data]. *News of universities. Geology and exploration*. (2), 21–29. (In Russian).

Maslov A. V., Gareev E. Z., Krupenin M. T., Kovalev S. G. (2013b) Litogeohimicheskie osobennosti glinistykh slancev satkinskoj svity nizhnego rifeya Bashkirskogo megantiklinoriya: novye dannye [Lithochemical features of clayey shales of the Satka Formation of the Lower Riphean of the Bashkir meganticlinorium: new data]. *Vestnik PGU. Geologiya*. (1), 9–19. (In Russian).

Maslov A. V., Krupenin M. T., Gareev E. Z., Anfimov L. V. (2001) *Rifej zapadnogo sklona YUzhnogo Urala (klassicheskie*

- razrezy, sedimento- i litogenez, minerageniya, geologicheskoe pamyatniki prirody*) [Riphean of the western slope of the Southern Urals (classical sections, sedimentation and lithogenesis, minerageny, geological natural monuments)]. Ekaterinburg: IGG UrO RAN. (1), 351 p. (In Russian).
- Maslov A.V., Nozhkin A.D., Podkovyrov V.N., Letnikova E.F., Turkina O.M., Grazhdankin D.V., Dmitrieva N.V., Isherskaja M.V., Krupenin M.T., Ronkin Ju.L., Gareev Je.Z., Veshheva S.V., Lepihina O.P. (2008). *Geohimija tonkozernistyh terrigenykh porod verhnego dokembrija Severnoj Evrazii* [Geochemistry of fine-grained terrigenous rocks of the Upper Precambrian of Northern Eurasia]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2008. 274 p. (In Russian).
- Mestorozhdeniya strategicheskikh i vysokotekhnologichnykh metallov Rossijskoj Federacii: zakonomernosti razmeshheniya, usloviya formirovaniya, innovacionnye tehnologii prognoza i osvoeniya: Nauchnye rezul'taty, poluchennye pri vypolnenii programmy № 1, 48 fundamental'nykh issledovanij Prezidiuma RAN* [Deposits of strategic and high-tech metals of the Russian Federation: patterns of location, formation conditions, innovative technologies for forecasting and development: Scientific results obtained during the implementation of program No. 1, 48 fundamental studies of the Presidium of the Russian Academy of Sciences]. Gl. red. — akademik RAN N. S. Bortnikov. *Otv. Sost. chl.-korr. RAN V. A. Petrov* (2020) Moscow, IGEM RAN, 317 p. (In Russian).
- Mironov YU.B., Karpunin A. M., Fuks V. Z. (2022) Epochs of formation and types of lithium deposits in foreign countries]. *Regional geology and metallogeny*. (92), 105–116. (In Russian).
- Michurin S. V., Biktimerova Z. R., Kazbulatova G. M., Gorozhanin V. M., Sultanova A. G., Karamova A. M., Vojkina Z. A., SHaripova A. A. Mineralogicheskie i geohimicheskie osobennosti karbonatnykh porod nizhnej podsvity inzerskoj svity verhnego rifeya v rajone d. Tolparovo (YUzhnyj Ural) (2021) [Mineralogical and geochemical features of carbonate rocks of the lower subformation of the Inzer Formation of the Upper Riphean in the area of the village of Tolparovo (Southern Urals)]. *Geologicheskii vestnik*. (1), 80–97. (In Russian). DOI: 10.31084/2619–0087/2021-1-8
- Michurin S. V., Sultanova A. G., Kazbulatova G. M., Sharipova A. A., Savel'ev D. E., Gorozhanin V. M., Karamova A. M., Voikina Z. A. (2020) Ftor i khlor v karbonatnykh porodakh lapyshtinskoi podsvity suranskoi svity nizhnego rifeya (Bagaryshtinskii razrez, Yuzhnyi Ural) [Fluorine and chlorine in carbonate rocks of the Lapyshtinsky subformation of the Suransky formation of the Lower Riphean (Bagaryshtinsky section, Southern Urals)]. *Geologicheskii vestnik*. (3), 3–26. (In Russian). DOI: 10.31084/2619–0087/2020-3-1
- Michurin S. V., Sharipova A. A., Kazbulatova G. M., Yuldashbaeva V. F. (2022) Mineralogicheskie i geohimicheskie osobennosti izvestnyakov katavskoj svity Aktashskoj ploschadi (YAmantavskij antiklinorij, YUzhnyj Ural) [Mineralogical and geochemical features of limestones of the Katav formation of the Aktash area (Yamantav anticlinorium, Southern Urals)]. *Geologicheskii vestnik*. (1), 83–93. (In Russian). DOI: 10.31084/2619–0087/2022-1-7
- Sultanova A. G. (2024) Nekotorye voprosy geohimii litiya [Some questions of lithium geochemistry]. *Geologiya, poleznyye iskopaemye i problemy geoekologii Bashkortostana, Urala i sopredel'nykh territorij: Materialy / 15-ya Mezhhregional'naya nauchno-prakticheskaya konferenciya, Ufa, 14–17 maya 2024 g.* Moskva: Izdatel'stvo «Pero», 220–225. (In Russian)
- Tkachev, A. V., Rundkvist D. V., Vishnevskaya N. A. (2018) Evolyucionnye aspekty metallogenii litiya: epohi nakopleniya, tipy mestorozhdenij i ih osobennosti [Evolutionary aspects of lithium metallogeny: accumulation epochs, types of deposits and their features]. *Razvedka i ohrana nedr.* (9), 10–18. (In Russian).
- Tolkushkina E. A., Torikova M. V., Komin M. F. (2012) Mineral'no-syr'evaya baza litiya: problemy razvitiya i ispol'zovaniya [Lithium mineral resource base: problems of development and use]. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*. (2), 2–8. (In Russian).
- Holodnov V. V., Bocharnikova T. D., SHagalov E. S. (2012) Sostav, vozrast i genezis magnetit-il'menitovykh rud srednerifjjskogo stratificirovannogo Medvedevskogo massiva (Kusinsko-Kopanskij kompleks YUzhnogo Urala) [Composition, age and genesis of magnetite-ilmenite ores of the Middle Riphean stratified Medvedevsky massif (Kusinsky-Kopansky complex of the Southern Urals)]. *Litosfera*. (5), 145–165.
- Shirobokova T. I. (1992) *Stratiformnoe polimetallicheskoje i baritovoe orudenenie Urala* [Stratiform polymetallic and barite mineralization of the Urals]. Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 137 p. (In Russian).
- Bradley D., Munk L.-A., Jochens H., Hynek S., Labay K. A. (2013) *Preliminary Deposit Model for Lithium Brines / USGS Open-File Report*. 9 p.
- Brigatti M. F., Lugli C., Poppi L., Foord E. E., Kile D. E. (2000) Crystal chemical variations in Li- and Fe-rich micas from Pikes Peak batholiths (central Colorado). *American Mineralogist*. 85, 1275–1286.
- Khotylev A. O., Tevelev A. V., Bychkova Ya. V., Latyshev A. V., Anosova M. B. (2020) Mezoproterozoic basite magmatism of the Bashkirian meganticlinorium (Southern Urals): age constraints, petrological and geochemical features. *Geodynamics & Tectonophysics*. 11 (2), 219–243. DOI: 10.5800/GT-2020-11-2-0471
- Ktalkherman M. G., Emelkin V. A., Pozdnyakov B. A. (2009) Production of lithium oxide by decomposition lithium carbonate in the flow of a heat carrier. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 43 (1), 88–93.
- U. S. Geological Survey, 2019. Mineral commodity summaries 2019: U. S. Geological Survey, 200 p. <https://doi.org/10.3133/70202434>
- Nicholson P. (1978) Past and future development of the market for lithium in the World aluminium industry. *Energy*. 3 (3), 243–246.
- Lindagato P., Li Y., Macháček J., Yang G., Mungwarakarama I., Ndahimana A., Ntwali H. P. K. (2023) Lithium Metal: The Key to Green Transportation. *Appl. Sci*. 13 (1), 405. <https://doi.org/10.3390/app13010405>
- Sheets J. (2000) New lithium market. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*. 21 (5), 97–99.
- Shlugaj J., Radwanek-Bąk B. (2022) Lithium sources and their current use. *Gospodarka surowcami mineralnymi — mineral resources management*. 38 (1), 61–88. DOI: 10.24425/gsm.2022.140613

Сведения об авторах:

Султанова Анна Геннадиевна, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. anna_zakharova.ig@mail.ru

Мичурин Сергей Васильевич, кандидат геолого-минералогических наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. s_michurin@mail.ru

About the authors:

Sultanova Anna Gennadiievna, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. anna_zakharova.ig@mail.ru

Michurin Sergey Vasilevich, PhD in Geologo-mineralogical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. s_michurin@mail.ru

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.*

Статья поступила в редакцию 03.06.2024; одобрена после рецензирования 03.06.2024; принята к публикации 22.07.2024.

The article was submitted 03.06.2024; approved after reviewing 03.06.2024; accepted for publication 22.07.2024.