

Литиевые гидротермалиты: перспективы и проблемы промышленного освоения

Г. Б. Мелентьев*, Е. С. Овчарова**, Р. М. Шевчук*,
В. М. Короткий*, Н. С. Поликашина***

* Объединённый институт высоких температур РАН,
г. Москва

** Акционерное общество управляющая горно-рудная компания
«Уранцветметгеологоразведка»,
Московская область, Красногорский район

*** Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких
элементов,
г. Москва

melent_gb@mail.ru
ovcharova_e@mail.ru
romanbuklya@gmail.com
korotkij@mail.ru
polikashinanina@yandex.ru

Аннотация

Анализируются перспективы и проблемы промышленного освоения литиевых гидротермалитов, представленных зарубежными и российскими месторождениями. Рассматриваются специфика их промышленно-генетических типов, уровни содержаний лития и состояние технологий его извлечения. Акцентируется внимание на зависимости направлений и темпов освоения рассматриваемых месторождений лития от степени их химико-технологической изученности, корпоративного взаимодействия инвесторов и потребителей литиевой продукции.

Ключевые слова:

литиевые гидротермалиты, промышленно-генетические типы месторождений, инвестиционная привлекательность, химико-технологическая изученность, комплексность и экологичность литиевого сырья

Введение

В информационно-аналитических обзорах 2020–2025 гг. нами последовательно обоснована необходимость и первоочередность промышленного освоения крупнейших в России месторождений эндогенного литиевого сырья, представленных редкометалльными гранитными пегматитами Кольского региона [1, 2]. Эта необходимость обусловлена двумя главными факторами: 1) лавинообразным увеличением мировой потребности в литии как эффективном компоненте новой безуглеродной энергетики с использованием в производствах литий-ионных аккумуляторов для автотранспорта и крупных накопителей энергии

Lithium hydrothermalites: prospects and problems of industrial development

G. B. Melentyev*, E. S. Ovcharova**, R. M. Shevchuk*, V. M. Korotky*, N. S. Polikashina***

* Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Moscow

** AO Management Mining Company
“Urantsvetmetgeologorazvedka”,
Krasnogorsky District, Moscow Region

*** Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystallochemistry of Rare Elements,
Moscow

melent_gb@mail.ru
ovcharova_e@mail.ru
romanbuklya@gmail.com
korotkij@mail.ru
polikashinanina@yandex.ru

Abstract

The article analyses the prospects and problems of industrial development of lithium hydrothermalites, represented by foreign and Russian deposits. The specifics of their industrial-genetic types, lithium content levels and the state of technologies for its extraction are considered. Attention is focused on the dependence of directions and rates of development of the study lithium deposits on the degree of the chemical-technological knowledge about these deposits, corporate interaction of investors and consumers of lithium products.

Keywords:

lithium hydrothermalites, industrial-genetic types of deposits, investment attractiveness, chemical-technological knowledge, complexity and environmental friendliness of lithium raw materials

и 2) промышленным освоением за рубежом природных рассолов как источников лития – конкурентов традиционного эндогенного пегматитового сырья.

Оцениваются различия между озерными рассолами поверхностной и погребенной рапы, служившими в 60–80-е гг. прошлого века источниками лития (США), термальными водами, разведанными в СССР (России), и наиболее перспективными для промышленного освоения глубинными литийсодержащими водными горизонтами и пластовыми рассолами крупнейших артезианских бассейнов Восточной Сибири, разведанными на нефть и газ.

Авторы не ограничились анализом материалов по водным объектам с повышенным и аномально высоким содержаниями лития, а включили в настоящий обзор вулканогенно-осадочные гидротермалиты, представленные месторождениями гекторитов – литиевых глин, и уникальным месторождением ядарита – бромидом лития, представленного продуктивными прослоями в толщах горючих сланцев и пирокластических отложениях в бассейне р. Ядар (Сербия).

Положительно оцениваются также перспективы извлечения лития из техногенных сбросов при эксплуатации углеродных, соляных, алмазных и некоторых других месторождений.

Очевидно, что промышленное освоение этих месторождений как новых источников лития определяется технологическими возможностями его максимального извлечения, которые предварительно рассматриваются в обзоре.

Изложенные материалы предназначены для использования научными специалистами при выборе новых направлений фундаментальных и прикладных исследований «многоликого» литиевого сырья, инженерами-геологоразведчиками при планировании соответствующих поисково-оценочных работ в новых районах и организации комплексной оценки перспективных объектов на литий с сопутствующими ценными компонентами, включая привлечение инновационных технологий их извлечения в России и за рубежом.

Озерная поверхностная и погребенная рапа

Месторождения этого типа были открыты и введены в эксплуатацию в XX в. в США в качестве промышленных источников лития – поверхностная рапа – оз. Серлс (Калифорния) и погребенная рапа Силвер-Пик (Невада) [3]. Месторождение сухого соленого оз. Серлс освоено в годы Второй мировой войны при содержании лития 0,015 % и запасах Li_2O около 7 млн т. Озерная рапа представляет собой межкристальные рассолы $\text{CO}_3\text{-Cl-Na Li}$, NaCl , KCl , бором. Химический завод в г. Трона более полувека производил из рапы оз. Серлс соду, сульфаты натрия и калия, хлорид кальция, бром и бромиды щелочных металлов, буру, борную кислоту, пироборат натрия, фосфорную кислоту, карбонат и сульфат лития на общую сумму 0,5 млрд дол. в год.

Рапа Силвер-Пик представляет собой сульфатный тип $\text{SO}_4\text{-Cl-Mg-Na}$ с сопутствующими Li , Br , I и сульфатами Na и Mg с минерализацией до 100 кг/м³. Объект галургического производства. Содержание лития в рассолах – 0,08 %, запасы – 7,4 млн т.

Кроме этих промышленно освоенных источников лития в США известны два соленых озера, неocenенных подобным же образом: оз. Солтон-Си (Долина Империял) с ресурсами лития 2,2 млн т и Большое соленое озеро площадью около 2,0 тыс. км² (по состоянию на 1968 г.); за 100 лет площадь озера сократилась в 2,5 раза. Глубина озера достигает 8–15 м, но в целом незначительная. Запасы LiCl – 4 млн т, что в пересчете на Li_2O составляет 1,3 млн т, сопоставимы с запасами промышленно значимых пегматитовых месторождений. Запасы сопутствующих солей

в поверхностной рапе составляют (млрд т): NaCl – 3,2; MgCl_2 – 0,63; Na_2SO_4 – 0,45–0,54; солей калия – 0,1–0,18. Рапа озера в течение 100 лет использовалась как источник добычи поваренной соли. В последние годы организованы исследовательские работы по извлечению хлорида и металлического магния, жидкого хлора, солей калия и лития.

Озерные месторождения лития, по мнению авторов, с геотехнологических и экономических позиций не могут рассматриваться в качестве конкурентов литиевого минерального сырья из пегматитов из-за крайне низких его содержаний сравнительно с регламентированными в исходных рудах (>1–2 % Li_2O) и товарных сподуменовых концентратах (5–7 % Li_2O) как продуктах обогащения добываемого сырья для последующих переделов. Однако обнаружение и вовлечение в промышленное использование литиевых саларов в Латиноамериканском «треугольнике» [4] (Чили, Аргентина, Боливия) с применением инновационных технологий извлечения лития позволяет, по мнению авторов, выделять эти источники лития в качестве литиевых гидротермалитов – конкурентов рудного лития.

Литиевые гидротермалиты латино-американского «треугольника» – конкуренты рудного литиевого сырья

В настоящее время мировой потребительский спрос на литий на 50 % удовлетворяется за счет традиционного рудно-пегматитового сырья и на 50 % – за счет инновационного гидроминерального сырья – литиевых гидротермалитов из бессточных солончаковых озер (саларов) высокогорных пустынь Андов в Чили, Аргентине и в ближайшей перспективе – Боливии. Открытия, изучение и оценка промышленной значимости литиевых саларов Латинской Америки последовали с конца 60-х гг. прошлого века после освоения соленых озер в США, которые значительно уступают латиноамериканским саларам по содержаниям лития, условиям возможностей естественного (природного) обогащения и, как следствие, по технологическим показателям промышленного извлечения и использования.

Запасы лития в рассолах саларов Чили оцениваются 3 (в тыс. т), Аргентины – 0,85 и Боливии – 5,4, а производство соответственно в 4500–6400 и 310–1000 т; в Боливии производство пока не организовано и оценивается в первые сотни тонн [5]. По запасам и производству лития из экспортируемого сподуменового сырья редкометалльных пегматитов лидером является Австралия – соответственно 160–570 тыс. т и 2800 т. Однако австралийский литиевый вектор ориентирован на экспорт рудного сырья, преимущественно в Китай, и поэтому производство химической литиевой продукции в этой наиболее богатой рудным литиевым сырьем стране, в отличие от Китая, не развито.

Следует заметить, что в период развития в США и Чили производства лития из гидроминерального сырья масштабы производства лития из сподуменовых руд сократились в связи с более низкой себестоимостью литиевых гидротермалитов.

Россия в рассматриваемый период приостановила добычу сподуменовой руды на единственном в стране эксплуатируемом Завитинском месторождении в Забайкалье и с 1997 г. по настоящее время не ввела в эксплуатацию какое-либо новое из числа разведанных в советское время. Компенсация частично осуществлялась за счет импорта сподуменового сырья и литиевых гидротермалитов Чили и Аргентины, которые в определенный период своего развития отказали нам в импортных поставках.

В рапе саларов трех латиноамериканских стран сосредоточено 85 % мировых запасов лития: 15 % – в Чили (Салар-де-Атакама), 10 % – в Аргентине (Салар-де-Хомбре Муэрто) и 60 % – в Боливии (Салар-де-Уюни). Экспорт карбоната лития – товарного химического продукта, производимого в Чили фирмой «SQM» и в Аргентине фирмой «FMC», осуществляется преимущественно в США, Китай и Германию [5].

Салар-де-Атакама расположен в северной части Чили на высоте 2300 м над ур. м. Его площадь составляет 3 тыс. км². Соляное ядро состоит из галитовой фации сульфатов и карбонатов. Слой галита имеет мощность 350 м в ядре и 50 м – по краям бассейна. Ресурсы лития в саларе составляют 4,5 млн т, подтвержденные запасы – 1,67 млн т. Содержания лития в рапе – 0,14 %, что в шесть раз превышает его содержание в погребенной рапе месторождения Силвер-Пик в США. Сопутствующие полезные компоненты представлены (в %): К – 1,87; Na – 6,92; Mg – 0,91; В – 0,04. Засушливый климат обеспечивает скорость испарения 300 мм в год и выпадение осадков ≤ 25 мм/год. Производство карбоната лития из салара в расчете на металл составило в 1980-е гг. 398–907 т/год. Попутно производится 150 тыс. т/год калийных солей в качестве удобрений.

Отсутствие в нашей стране территорий аридного климата как главного фактора формирования рассматриваемых месторождений литиевых гидротермалитов, представляющих собой наиболее выгодное с ресурсно-технологических позиций литиевое горно-химическое сырье, обусловило создание в Боливии совместного с Россией предприятия по добыче рассола и производству конечной товарной продукции в объеме 14 тыс. т [6, 7]. Боливийская государственная компания YLB и российская Uranium One Group с лета 2023 г. получили возможность промышленного освоения инвестиций Росатома в сумме 600 млн дол. в течение 3-х лет. Планировалось использование российской сорбентной технологии прямого извлечения лития (до 90 %) из рассолов. Этот проект освоения литиевых гидротермалитов – первый в структуре Росатома зарубежный источник лития, дополнительный к запланированному его производству с 2028 г. за счет ввода в эксплуатацию Колмозерского месторождения сподуменных пегматитов [8].

Боливийское правительство во главе с президентами социалистической ориентации Эва Моралесом, а затем Луиса Арсе с 1921 г. форсирует промышленное освоение и использование литиевого сырья солончаков Уюни, Партос Градес и Койпас.

Салар-де-Уюни расположен на ЮЗ Боливии в Андах на высоте 3653 м. Он занимает площадь 9 тыс. км², про-

стираясь на 100–120 км. Ресурсы лития в этом саларе оцениваются в 5,5 млн т при средних содержаниях 0,025 %. В пределах салара выявлена зона площадью 30 км² с аномально высокой концентрацией лития (0,09–0,4 %). Содержание в рапе салара сопутствующих полезных компонентов составляют (%): К – 0,62; Na – 9,1; Mg – 0,54. Соотношение Mg/Li составляет 21,5 (в Силвер-Пик – 1,5, в Салар-де-Атакама – 6,6). Максимальные содержания Mg (6 %), К (3 %) и В (0,4 %) установлены в верхних слоях соляной толщи. В целом, Салар-де-Уюни превосходит Салар-де-Атакама по запасам лития, но значительно уступает ему по содержанию лития в рапе и степени испарения [6, 7].

В отличие от солончаков Чили и Аргентины, боливийские рассолы содержат больше химических примесей, а сезон дождей на солончаках длится несколько месяцев. Эти факторы отрицательно влияют на эффективность принятого в Чили и Аргентине метода выпаривания рассолов в бассейнах – прудах. Боливия вложила около 800 млн дол. в этот метод, включая сеть прудов и незавершенный завод прудов мощностью до 15 тыс. т карбоната лития в год.

Таким образом, рассолы латиноамериканских саларов отличаются аномально высоким содержанием лития, уступающим только редкометалльному пегматитовому сырью, логистической и технологической доступностью и продуктивностью природного химического состава, не требующего традиционного для рудного сырья обогащения. Эти качества литиевых гидротермалитов позволяют рассматривать и оценивать их, несмотря на транспортные издержки логистики, в качестве наиболее выгодного и экономически привлекательного промышленного источника лития путем привлечения к этим проектам четырех компаний: вышеназванной Российской, Lilas solutions США и двух китайских: Citic Gucao и TB EA Group [7]. Амбициозные планы Боливии предусматривают перспективу создания к 2030 г. мировой столицы лития на базе 21 % от его мировых запасов (23 млн т) и 40%-ного уровня планируемых поставок на мировой рынок. При этом особое внимание привлекает стремление Боливии разработать и использовать лучшие технологии прямого извлечения лития и организации его производств.

Реализация амбициозных литиевых планов Боливией – самой бедной страны Южной Америки, не имеющей выхода к морю, при производстве в 2021 г. всего 543 т лития (из 600 тыс. т мирового производства) ориентирует на перспективы нашей страны стать лидером в организации соответствующих производств полного технологического цикла и объемах импорта боливийской литиевой продукции. В каждом из трех боливийских саларов возможное производство карбоната лития оценивается в 25 тыс. т/год, т. е. в сумме – до 75 тыс. т.

Подземные самоизливающиеся термальные воды – перспективный российский источник лития

Наиболее перспективным на литийсодержащее гидроминеральное сырье регионом России представляется Северокавказский, в пределах которого простирается

Восточно-Предкавказский артезианский бассейн (ВПАБ) площадью более 200 км². В нижних горизонтах этой структуры залегают высокоминерализованные воды хлоридно-натриевого и карбонатного составов с минерализацией 60–210 г/дм³ и температурами 130–220° С и выше. Газонасыщенность этих вод достигает 10 м³/м³ и выше. Термальные воды, согласно исследованиям специалистов Института проблем геотермии Дагестанского научного центра (филиал ОИВТ РАН, Москва), характеризуются содержаниями (м³/дм³): лития – 40–95, рубидия – 10, цезия – 1–3, стронция – 260–950 при 270–800 магния и 1400–10000 кальция, и представляют собой промышленное гидроминеральное сырье [9–11].

Специфика поликомпонентного состава термальных вод Дагестана изучена на трех месторождениях, разведанных еще в СССР: Берикейском, Сухокумском и Тарумовском (табл. 1). Эта специфика обусловила разработки специалистами Института проблем геотермии нового, в отличие от галургической технологии, способа сорбционного извлечения лития из хлоридных гидротермальных рассолов. В качестве эффективного сорбента использован и рекомендован для внедрения аморфный гидроксид алюминия (ГОА), а также способы его переработки в карбонат лития экстракцией в замкнутом цикле [10, 11].

С использованием результатов химико-технологической оценки возможностей комплексного использования геотермального сырья Берикейского месторождения, расположенного в 3 км от береговой линии Каспийского моря и в 100 км южнее г. Махачкалы, оцениваются очевидные

перспективы промышленного освоения как Берикейского, так и двух других разведанных месторождений высокопродуктивных гидротерм. Проектом освоения Берикейя предусматривается получение из подземных рассолов 2 тыс. т карбоната лития в год при добыче до 10 млн. т/м³ продуктивных гидрогеотерм. Для этого потребуются восстановить 17 скважин и обустроить водозабор при самоизливающихся скважинах 1500 м³/сутки. С учетом капитальных вложений на эти цели, а затем строительства завода потребуется 1500 млн руб., что обеспечит себестоимость 1 т карбоната лития в 110 руб. и годовое производство 111 т [9]. Проектом одновременно предусматривается рациональное решение энергетических проблем ГеоЭС, предназначенной для местного производства электроэнергии за счет эксплуатации термальных вод. Предусматривается опреснение воды на выходе с ГеоЭС и использование ее в решении местных водохозяйственных проблем.

Таким образом, самоизливающиеся термальные воды Дагестана представляют собой конкурентоспособное литийсодержащее сырье, использование которого благодаря положительным оценкам перспектив недропользования и новым российским технологиям представляется инновационным и заслуживающим опытно-промышленной оценки с последующим освоением.

Высококомплексные глубинные и пластовые воды нефтегазоносных артезианских бассейнов Сибири как перспективные промышленные источники лития

В условиях отсутствия в России территорий с аридным климатом, необходимым для формирования месторождений литиевых гидротермалитов, необходимо учитывать альтернативные возможности перспективной оценки на литий гидротермальных ресурсов глубинных вод и рассолов и пластовых вод крупных артезианских бассейнов Восточной Сибири, включающих разведываемые на нефть и газ площади и участки.

Хлоридные глубинные воды артезианских бассейнов, представляющие практический интерес, залегают на глубине 2–5 км. Их минерализация составляет 150–250 г/л, температура – 20–100° С. Эти воды служат промышленным источником йода и брома. Для них характерна обогащенность литием (30–80 мг/л), рубидием (1–3 мг/л), цезием (0,2–0,5 мг/л) и стронцием (600–1500 мг/кг). Пока эти редкие металлы из глубинных вод артезианских бассейнов не извлекаются, несмотря на гигантские объемы сопутствующей добычи подземных вод нефтяных и газовых месторождений, исчисляемые миллиардами тонн (в США – 1,5 млрд т). Наиболее полная и дифференцированная оценка распределения широкого комплекса особо ценных и токсичных компонентов в подземных рассолах, соляных и углеводородных залежей содержится в опубликованных работах М. В. Ториковой (ИМГРЭ), включая результаты специального опробования и многокомпонентных анализов подсолевых рассолов Прикаспийской нефтегазовой провинции [12].

Решение проблемы попутных рассолов нефтегазодобычи для нашей страны весьма актуально в связи с отсутствием месторождений литиевых озерных гидротерма-

Таблица 1
Состав термальных вод (мг/дм³) Дагестана

Table 1
Composition of thermal waters (mg/dm³) of Dagestan

Показатель	Месторождение		
	Тарумовское	Сухокумское	Берикейское
Li+	195	40	44
K+	3750	670	590
Na+	55000	32000	24060
Rb+	10	3	4
Cs+	3	1	1
Mg ²⁺	800	720	270
Ca ²⁺	10000	7700	1400
Sr ²⁺	950	630	260
Ba ²⁺	1000	83	230
Fe _{общ}	496	58	23
Cl ⁻	125000	65120	41050
Br ⁻	630	320	165
I ⁻	20	13	15
HCO ₃ ⁻	73	415	1350
SO ₄ ²⁻	–	50	–
H ₂ BO ₃	150	380	330
H ₂ SiO ₃	36	3	24
Минерализация	198113	108205	69810
ХПК, мгО ₂ /дм ³	1120	2275	720
Механические примеси	–	740	4462

Составлено по: [10, 11].

Compiled according to: [10, 11].

литов и районов аридного климата как с экономических, так и экологических позиций. В промышленно-развитых странах (США, Япония, Германия, Италия) доходы от извлечения редких металлов из гидротермального сырья составляют значительную долю их мировой добычи и достигают 50 % от суммарного производства и потребления.

В СССР были разведаны 14 месторождений комплексного гидроминерального сырья и созданы опытно-промышленные установки и заводы для эксплуатации пяти месторождений. Однако на литий было разведано единственное месторождение Джарчи в Узбекистане, связанное с нефтеконденсатной залежью. Дебит литийсодержащих вод составлял 4142 м³/сутки, т. е. примерно 1 млн м³/год, что позволяло рассчитывать на добычу 5,5 тыс. т лития/год в течение 27 лет [6].

В табл. 2 приведены основные параметры перспективных на литий гидротермальных ресурсов, сопутствующих разведываемым месторождениям нефти и газа в пределах Ангаро-Ленского артезианского бассейна. Среди них выделяется своими гидротермальными ресурсами и содержаниями лития (до 480 мг/л) Знаменское месторождение в Иркутской области, включающее крупнейшее газоконденсатное Кобыткинское месторождение. С вводом в эксплуатацию Восточного газопровода Ковыкта может обеспечить литийсодержащими рассолами крупное промышленное производство по их комплексной переработке и использованию, включая экспорт химической продукции в страны АТР.

Высококомплексные глубинные и пластовые воды нефтегазоносных артезианских бассейнов служат источниками йода и хрома. Для их хлоридно-кальций-натриевого типа минерализации характерна обогащенность редкими щелочными металлами: Li – 3080 мг/л, Rb – 1–3, Cs – 0,2–0,5 мг/л и стронцием – 600–1000 мг/л [6]. Объемы сопутствующих при добыче нефти и газа подземных вод исчисляются миллиардами тонн: в США – 1,5 млрд т и значительно больше в России. Редкие металлы из этих грандиозных источников пока не извлекаются. Специфика распределения в подсоленных толщах Прикаспийской нефтегазовой провинции, включая рассолы, изложена М. В. Ториковой [12].

Объемы реальных гидроминеральных ресурсов России как источников редких металлов (Li, Rb, Cs, Sr) и добываемых из них дефицитных I, Br, B оцениваются

в 820 млн м³/год, что может обеспечить извлечение из них (тыс. т): йода – 15,0; брома – 140,0; бора – 30,0; стронция – 130,0; лития (металла) – 10,0; рубидия – 0,5; цезия – 0,1.

Реализация этих возможностей представляется реальной за счет ускоренного вовлечения в комплексное промышленное использование новых месторождений в Иркутской, Астраханской, Архангельской областях и Республике Коми.

В качестве нового региона, перспективного на подземные литийсодержащие гидроминеральные ресурсы, следует рассматривать Республику Коми, для которой обосновываются задачи разведки и комплексной оценки перспектив на литий, бром и йод. Промышленные концентрации этих элементов установлены в водах многочисленных скважин на территории нефтегазоносного бассейна в Усинском и Вуктыльском районах, на разных глубинах и горизонтах с тенденцией увеличения концентраций с глубиной. Разработана и опробована схема двухстадийного электролиза пластовых нефтяных вод и рассолов на серийном отечественном оборудовании модульных установок.

Гекториты – перспективное вулканогенно-осадочное литиевое сырье

Гекторит как новый глинистый минерал, содержащий до 1–1,2 % лития, впервые был описан в 1941 г. в районе г. Гектор в штате Калифорния на шахте, вскрывающей залежи бентонитов с гекторитом как продуктом изменения клиноптилолита под воздействием горячих источников на вулканогенные отложения. Большое месторождение гекторита обнаружено на литиевом месторождении Такер-Пасс в кальдере Макдермитт в штате Невада. Гекторитовые месторождения известны также в штате Аризона, странах Северной Африки, Франции, Турции и Узбекистана (Шаваз-сай).

По химическому составу гекторит представляет собой водный силикат Na, Mg, Li. Используется как абсорбент и косметическое средство. Особые свойства гекторита обусловлены слоистой спецификой его наноструктуры.

В настоящее время литиевые глины привлекают внимание геологов, химиков-технологов и производственников как потенциальный промышленный источник лития.

Наиболее крупные, потенциально промышленные его месторождения в глинах выявлены в Мексике. При этом половина из 24 предварительно оцененных месторождений литиевых глин оценивается как объекты планируемой эксплуатации. Запасы лития в мексиканских месторождениях, по данным Геологической службы США по результатам на 2025 г., оцениваются примерно в 1,7 млн т. Крупнейшим месторождением литиевых глин на севере Мексики является Сонора. Его запасы составляют 8,8 млн т эквивалента карбоната лития (LCE), хотя технология его извлечения из этого нового вида сырья не решена в промышленных масштабах.

Таблица 2
Table 2
Прогнозируемые параметры глубинных литийсодержащих рассолов Ангаро-Ленского артезианского бассейна и ожидаемые производства

Predicted parameters of deep lithium-containing brines of the Angara-Lena artesian basin and expected production

Параметры прогнозируемых производств	Месторождения		
	Знаменское	Верхнечонское	Ярактинское
Запасы рассолов	Разведанные запасы 40 тыс. м ³	632 млн т	68 млн т
Средние содержания лития	0,42 г/л	30 мг/л	49 мг/л
Прогнозируемые масштабы производств лития	400 т Li/год	338 т/год	134 т/год
Добыча за время эксплуатации	–	18960 т (56 лет)	3350 т (25 лет)

Принципиально важным представляются законодательные инициативы Мексики, объявившие литий стратегическим ресурсом и исключительную роль государства в разведке, добыче и коммерциализации литиевой продукции. В этих целях в 2022–2023 гг. была создана государственная компания Litio Mx (Lithium for Mexico). Однако отсутствие необходимых государственных инвестиций, освоенных технологий и дефицит водных ресурсов в районе Сонора не позволяют рассчитывать на оперативное освоение государством как Сонора, так и других месторождений литиевых глин в Мексике, в том числе в связи с ее близостью к США с их технологическим и инвестиционным потенциалом. Выход – привлечение в качестве партнеров дружественных промышленно-развитых стран.

Ядарит – новый промышленно-генетический источник лития

Ядарит – новый минерал, боросиликат лития и натрия с гидроксидом $\text{LiNaBSiO}_3(\text{OH})$. Обнаружен в бассейне р. Ядар (Сербия) в керне неогеновых (миоцен) горючих сланцев и пирокластических отложений мощностью в несколько метров. Химический состав ядарита (%): Li_2O – 7,38; Na_2O – 14,96; SiO_2 – 26,30; B_2O_3 – 47,12; H_2O – 4,31; $\Sigma=99,97$.

Проекты Rio Tinto и других компаний, включая российскую, до сих пор остаются нереализованными из-за экологической оппозиции местного сербского населения планам геологоразведки и тем более горной разработки рудных участков с промышленными содержаниями лития и бора. Очевидно, что выходом из создавшегося положения могут быть разработки и использование инновационных геотехнологических методов извлечения из недр лития и бора, особая ценность которых ориентирует на проведение специальных геотехнологических исследований на представительных пробах в химико-технологических лабораториях, прежде всего, дружественных промышленно-развитых стран.

Первооткрыватели минерала и месторождения Jadar – геологи крупной Австралийской компании Rio Tinto оценивают перспективы освоения нового источника лития как «захватывающие». Его ресурсы оцениваются в 200 млн т руды со средним содержанием 1,86 % Li_2O и 19,2 % B_2O_3 , что позволяет рассчитывать на удовлетворение 10 % мирового спроса на литий. Rio Tinto подписала с правительством Сербии меморандум о взаимодействии, что позволило инвестировать в будущий проект геологоразведочных работ 20 млн дол. в 2017 г. и в будущую разработку месторождения – 90 млн дол.

Совокупность геолого-геохимических данных об участках локализации ядарита в Сербии и автономной Сербской Республике в Боснии и Герцеговине свидетельствует о гидротермально-вулканогенно-осадочном происхождении литиево-боратных руд с центрами вулканогенной деятельности Цера и Барана.

Изложенные материалы свидетельствуют о том, что потребительская «многоликость» лития удовлетворяется за рубежом ресурсами литиевых гидротермалитов и редкометалльных пегматитов, в то время как в России – ис-

ключительно рудным литиевым сырьем из пегматитовых месторождений. При этом Россия после прекращения добычи забайкальской литиевой руды с 1997 г. по настоящее время не ввела в эксплуатацию какое-либо новое месторождение редкометалльных пегматитов, и тем более, из числа разведанных в советское время литиевых гидротермалитов в Дагестане при наличии апробированных технологий обогащения и химического извлечения лития из соответствующих видов сырья. В этот период Россия частично удовлетворяла свои потребности в литии за счет импорта сподуменовых концентратов из стран Африки и Китая, а также карбоната лития из саларов Чили и Аргентины, прекративших поставки. В то же время Китай стал мировым лидером в производствах литиевых аккумуляторов (ЛИА) и электромобилей на гигафабриках с использованием как собственного литиевого сырья, так и зарубежного за счет экспансии в страны его обладатели и организации импорта.

Мировое производство лития только в период с 2007 по 2022 г., по данным Геологической службы США, увеличилось с 25 до 130 тыс. т, а использование его доли в производстве ЛИА возросло с 20 до 80 %. Очевидно, что замена двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на электрические и создание мощных аккумуляторов-хранителей энергии на объектах возобновляемой природной энергетики представляют собой этап глобального развития безуглеродной энергетики [13]. Соответственно, в 2022–2023 гг. стоимость карбоната лития, товарного химического продукта производств ЛИА, увеличилась в 20 раз (600 тыс. юаней) сравнительно с минимумом в 30 тыс. юаней в 2020 г.

Потребительская «многоликость» лития и возрастающие масштабы его использования в качестве стратегического компонента в развитии безуглеродной энергетики обеспечиваются в обозримом будущем его мировыми запасами и ресурсами: в магматогенных минеральных рудах они оцениваются в 65 млн т, из которых 15 млн т являются потенциально извлекаемыми с применением современных технологий. Гидроминеральные ресурсы лития значительно беднее рудных пегматитовых, но содержат его в минеральных солях или растворенных формах и представляются возобновляемыми.

«Лавинообразный» потребительский спрос на литий во всем мире ориентирует на укоренное, в отличие от прежних лет, и масштабированное увеличение его производства в нашей стране, включая необходимость организации добычи лития за рубежом и импорта его в Россию. Богатые литием гидротермалиты Боливии являются наиболее привлекательным для импорта сырьем, но в перспективе следует иметь в виду и литиевые глины – гекториты, подобные мексиканским, и сербский ядарит. При этом решение технологических задач следует считать приоритетным товарным продуктом, в том числе – не зависящим от участия разработчиков в освоении литиевых месторождений.

Приведенные примеры государственных приоритетов над частными в планах освоения месторождений лития в Боливии, Мексике и, возможно, в Сербии заслуживают особого внимания и в планах развития производств лития в нашей стране. Тем самым может быть обеспечена необхо-

димая устойчивость государственных проектов промышленного освоения источников лития, создания и развития производств полного технологического цикла и коммерческой реализации конечной товарной продукции как на внутреннем и международном рынках, так и в создании производств ЛИА и электромобилей на гигафабриках.

Рекомендуемая современная организация высококомплексных производств на базе литиевого сырья требует оперативной межведомственной координации исполнителей будущих проектов на научно-практических конференциях под эгидой РАН и Ростеха при участии специалистов Росатома, МПР и других ведомств.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источники и литература

1. Мелентьев, Г. Б. Ресурсно-технологические проблемы воссоздания и развития российских производств лития и особо ценных рассеянных редких металлов: состояние и приоритеты реализации / Г. Б. Мелентьев // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: сб. докладов международной научно-практической конференции с международным участием (6–9 октября 2020 г.). – Екатеринбург: ИМЕТ УрО РАН, 2020. – С. 36–49.
2. Мелентьев, Г. Б. Приоритетные минеральные ресурсы и «критические» материалы России для производства литий-ионных аккумуляторов / Г. Б. Мелентьев, Р. М. Шевчук, Л. М. Делицын [и др.] // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экономические науки». – 2023. – №3 (61). – С. 59–70.
3. Коган, Б. И. Кардинальные сдвиги в литиевой промышленности за рубежом / Б. И. Коган, В. А. Названова // Редкие элементы: сырье и экономика. – М.: Изд-во ИМГРЭ, Мингео СССР, 1979. – № 14. – С. 3–39.
4. Livenceva, A. “White gold” of Ukraine | Lithium mineralization / A. Livenceva // Tierra y tecnología. – 2022. – № 60. – DOI: <https://dx.doi.org/10/21028/h1.2022.11.08>.
5. Гончарова, Л. И. Современное состояние, основные тенденции, конъюнктура и перспективы развития рынка лития / Л. И. Гончарова, В. Д. Новосельцева // Север и рынок. Формирование экономического порядка. – 2019. – № 6 (62). – С. 114–124.
6. Бондаренко, С. С. Перспективы ускоренного вовлечения в промышленное использование природных и техногенных гидроминеральных ресурсов России / С. С. Бондаренко, Г. Б. Мелентьев // Технологические ресурсы и инновации в техноэкологии / под ред. Е. М. Шелкова и Г. Б. Мелентьев. – М.: ОИВТ РАН, 2008. – С. 120–132.
7. Rodrigo Campos and Lucinda Elliott. Bolivia's Arce open to EU lithium tie-ups to rev battery metal output / <https://www.reuters.com/markets/commodities/bolivas-arce-open-eu-lithium-tie-ups-rev-battery-metal-output-2023-09-20/>. – URL: <https://www.reuters.com> (date of access: February 10, 2025).
8. Мелентьев, Г. Б. Литиевый потенциал России / Г. Б. Мелентьев // Редкие Земли. – 2016. – Вып. 2 (7). – С. 150–163.
9. Алхасов, А. Б. Перспективы комплексного освоения высокопараметрических геотермальных рассолов / А. Б. Алхасов, Д. А. Алхасова, А. Ш. Рамазанов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2015. – № 6. – С. 11–17. – DOI: 10.1134/S0040363615060016
10. Рамазанов, А. Ш. Pat. №1729088 SU. Способ получения соли лития из литийсодержащих вод / А. Ш. Рамазанов, И. А. Камалутдинова // Промышленная собственность. – 2003. – № 15.
11. Рамазанов, А. Ш. Получение карбоната лития высокого качества из литийсодержащих природных рассолов / А. Ш. Рамазанов, Д. Р. Атаев, И. А. Каспарова // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». – 2021. – Т. 64, вып. 4. – С. 52–58.
12. Торикова, М. В. Металлоносные рассолы / М. В. Торикова // Разведка и охрана недр. – 2004. – № 11. – С. 48–56.
13. Мелентьев, Г. Б. Ресурсно-технологические проблемы и перспективы новой российской энергетики (литий, водород, торий) / Г. Б. Мелентьев, В. М. Короткий // Актуальные проблемы, направления и механизмы развития производительных сил Севера – 2024: сб. ст. Девятой Всерос. науч.-практ. конфер. (18–20 сентября 2024 г., Сыктывкар): в 2-х ч. – Сыктывкар, 2024. – Ч. I. – С. 39–48.

References

1. Melentyev, G. B. Resursno-technologicheskie problemy vossozdaniya i razvitiya rossijskikh proizvodstv litiya i osobo cennykh rasseyannykh redkikh metallov: sostoyanie i prioritety realizacii [Resource and technological questions of reconstruction and development of Russian production of lithium and highly valuable dispersed rare metals: status and priorities of implementation] / G. B. Melentyev // Perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroeniya s ispolzovaniem zavershennykh fundamentalnykh issledovaniy i NIOKR [Prospects for the Development of Metallurgy and Mechanical Engineering using Completed Fundamental Research Projects and R&D]: Collection of Reports of the International Scientific and Practical Conference with International Participation (October 6–9, 2020). – Ekaterinburg: Vatonin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2020. – P. 36–49.
2. Melentyev, G. B. Prioritetnye mineralnye resursy i “kriticheskie” materialy Rossii dlya proizvodstva litij-ionnykh akkumulyatorov [Priority mineral resources and “critical” materials of Russia for the production of lithium-ion batteries] / G. B. Melentyev, R. M. Shevchuk, L. M. Delicyn [et al.] // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Economic Sciences”. – 2023. – № 3 (61). – P. 59–70.
3. Kogan, B. I. Kardinalnye sdvigi v litievoj promyshlennosti za rubezhom [Cardinal shifts in the lithium industry abroad] / B. I. Kogan, V. A. Nazvanova // Redkie elementy.

- syryo i ekonomika [Rare Elements: Raw Materials and Economy]. – Publishing House of the Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, Ministry of Geology of the USSR, Moscow, 1979. – № 14. – P. 3–39.
4. Livenceva, A. “White gold” of Ukraine | Lithium mineralization / A. Livenceva // *Tierra y tecnología*. – 2022. – № 60. – DOI: <https://dx.doi.org/10/21028/h1.2022.11.08>.
 5. Goncharova, L. I. Sovremennoe sostoyanie, osnovnye tendencii, konyunktura i perspektivy razvitiya rynka litiya [Current state, basic trends, economic situation and prospects for the development of the lithium market] / L. I. Goncharova, V. D. Novoseltseva // *Sever i rynek. Formirovanie ekonomicheskogo poryadka [The North and the Market. Formation of Economic Order]*. – 2019. – № 6 (62). – P. 114–124.
 6. Bondarenko, S. S. Perspektivy uskorennoogo вовлечeniya v promyshlennoe ispolzovanie prirodnykh i tekhnogennykh gidromineralnykh resursov Rossii [Prospects for accelerated involvement in the industrial use of natural and man-made hydromineral resources of Russia] / S. S. Bondarenko, G. B. Melentyev // *Tekhnologicheskie resursy i innovacii v tekhnologii [Technological resources and innovations in technology]* / Ed. E. M. Shelkova, G. B. Melentyev. – M.: Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 2008. – P. 120–132.
 7. Rodrigo Campos and Lucinda Elliott. Bolivia's Arce open to EU lithium tie-ups to rev battery metal output / <https://www.reuters.com/markets/commodities/bolivas-arce-open-eu-lithium-tie-ups-rev-battery-metal-output-2023-09-20/>. – URL: <https://www.reuters.com> (date of access: February 10, 2025).
 8. Melentyev, G. B. Litievyy potencial Rossii [Lithium potential of Russia] / G. B. Melentyev // *Redkie Zemli [Rare Earths]*. – 2016. – Vol. 2 (7). – P. 150–163.
 9. Alkhasov, A. B. Perspektivy kompleksnogo osvoeniya vysokoparametricheskikh geotermalnykh rassolov [Prospects for the integrated development of highly parametric geothermal brines] / A. B. Alkhasov, D. A. Alkhasova, A. Sh. Ramazanov [et al.] // *Teploenergetika [Thermal Power Engineering]*. – 2015. – № 6. – P. 11–17. – DOI: 10.1134/S0040363615060016.
 10. Ramazanov, A. Sh. Pat. № 1729088 SU. Sposob polucheniya soli litiya iz litijsoderzhashchikh vod [Method of obtaining lithium salt from lithium-containing waters] / A. Sh. Ramazanov, I. A. Kamalutdinova // *Promyshlennaya sobstvennost [Industrial Property]*. – 2003. – № 15.
 11. Ramazanov, A. Sh. Poluchenie karbonata litiya vysokogo kachestva iz litijsoderzhashchikh prirodnykh rassolov [Obtaining high-quality lithium carbonate from lithium-containing natural brines] / A. Sh. Ramazanov, D. R. Ataev, I. A. Kasparova // *Proceedings of Higher Educational Institutions. Series “Chemistry and Chemical Technology”*. – 2021. – Vol. 64, Iss. 4. – P. 52–58.
 12. Torikova, M. V. Metallonosnye rassoly [Metalliferous brines] / M. V. Torikova // *Razvedka i ohrana nedr [Exploration and Protection of the Subsoil]*. – November 2004. – № 11. – P. 48–56.
 13. Melentyev, G. B. Resursno-tekhnologicheskie problemy i perspektivy novoj rossijskoj energetiki (litij, vodorod, torij) [Resource and technological issues and prospects of the new Russian energy industry (lithium, hydrogen, thorium)] / G. B. Melentyev, V. M. Korotkiy // *Aktualnye problemy, napravleniya i mekhanizmy razvitiya proizvoditelnykh sil Severa – 2024 [Actual Goals, Directions and Mechanisms of Productive Forces Development of the North – 2024]: Collection of Articles of the Ninth All-Russian Scientific and Practical Conference (September 18–20, 2024, Syktyvkar): 2 parts. Syktyvkar, 2024. – Part I. – P. 39–48.*

Информация об авторах:

Мелентьев Гелий Борисович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, Российская Федерация, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2; e-mail: melent_gb@mail.ru).

Овчарова Елена Сергеевна – Акционерное общество управляющая горно-рудная компания «Уранцветметгеологоразведка» (143421, Российская Федерация, Московская обл., Красногорский р-н, Новорижское шоссе 9 км; e-mail: ovcharova_e@mail.ru).

Шевчук Роман Михайлович – инженер-эколог Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, Российская Федерация, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2; e-mail: romanbuklya@gmail.com).

Короткий Василий Михайлович – ведущий инженер, патентовед-исследователь Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, Российская Федерация, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2; e-mail: korotkij@mail.ru).

Поликашина Нина Сергеевна – научный сотрудник Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (121357, Российская Федерация, г. Москва, ул. Вересаева, д. 15; e-mail: polikashinanina@yandex.ru).

About the authors:

Geliy B. Melentyev – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher at the Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (13 Izhorskaya str., stroenie 2, Moscow, 125412 Russian Federation; e-mail: melent_gb@mail.ru).

Elena S. Ovcharova – AO Management Mining Company “Urantsvetmetgeologorazvedka” (9 km, Novorizhskoe shosse, Krasnogorskiy District, 143421 Moscow Region, Russian Federation; e-mail: ovcharova_e@mail.ru).

Roman M. Shevchuk – Environmental Engineer, Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (13 Izhorskaya str., stroenie 2, Moscow, 125412 Russian Federation; e-mail: romanbuklya@gmail.com).

Vasily M. Korotkiy – Leading Engineer, Patent Researcher (Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (13 Izhorskaya str., stroenie 2, Moscow, 125412 Russian Federation; e-mail: korotkiy@mail.ru).

Nina S. Polikashina – Researcher, Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystallochemistry of Rare Elements (15 Vere-saev str., Moscow, 121357 Russian Federation; e-mail: polikashinanina@yandex.ru).

Для цитирования:

Мелентьев, Г. Б. Литиевые гидротермалиты: перспективы и проблемы промышленного освоения / Г. Б. Мелентьев, Е. С. Ов-чарова, Р. М. Шевчук [и др.] // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экономические науки». – 2025. – № 5 (81). – С. 65–73.

For citation:

Melentyev, G. B. Litievye gidrotermality: perspektivy i problemy promyshlennogo osvoeniya [Lithium hydrothermalites: pros-pects and problems of industrial development] / G. B. Melentyev, E. S. Ovcharova, R. M. Shevchuk [et al.] // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Economic Sciences”. – 2025. – № 5 (81). – P. 65–73.

Дата поступления статьи: 26.05.2025

Прошла рецензирование: 26.05.2025

Принято решение о публикации: 26.05.2025

Received: 26.05.2025

Reviewed: 26.05.2025

Accepted: 26.05.2025