

Приоритетные минеральные ресурсы и «критические» материалы России для производства литий-ионных аккумуляторов

Г.Б. Мелентьев¹, Р.М. Шевчук¹, Л.М. Делицын¹,
Е.Н. Малинина², Е.С. Овчарова³, Н.С. Поликашина²

¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
г. Москва

² Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов,
г. Москва

³ АО УГРК «Уранцветмет»,
г. Москва

melent_gb@mail.ru

Аннотация

Проблема создания и обеспечения производств литий-ионных аккумуляторов в России включает анализ возможностей использования отечественных природных и «критически важных» материалов. В качестве наиболее крупных и доступных источников литиевого сырья, рекомендованных нами для первоочередного промышленного освоения, рассматриваются разведанные геологами СССР в середине прошлого века крупные месторождения редкометалльных гранитных пегматитов, локализованные в пределах двух докембрийских кристаллических щитов Европейской России – на Крайнем Севере (Кольское Заполярье) и Юге (Новороссия). Приводится сравнительная оценка результатов геолого-разведочных работ и исследований этих месторождений, рекомендации на их доизучение с современных позиций, условий и специфики промышленного освоения. Среди «критических» материалов основное внимание уделено литиевым солям и высококачественному графиту, в то время как другие металло-рудные продукты (Ni, Cu, Co, Al, Fe и др.) производятся в нашей стране в необходимых количествах и в перспективе (за исключением марганца) не представляются дефицитными. Впервые рекомендуется синхронизация доизучения и промышленного освоения отечественного литиевого сырья на Крайнем Севере и Юге с изысканиями и перспективной оценкой в тех же регионах графитового сырья, создание горно-химико-металлургических производств полного технологического цикла и программно-целевая организация комплекса научно-производственных работ как стратегического госзаказа.

Ключевые слова:

литиевая энергетика, редкометалльные пегматиты, сподумен, геологоразведка, Кольский регион, Новороссия, «критические» материалы, графит, перспективная оценка, промышленное освоение

Priority mineral resources and “critical” materials of Russia for production of lithium-ion batteries

G.B. Melentiev¹, R.M. Shevchuk¹, L.M. Delitsyn¹,
E.N. Malinina², E.S. Ovcharova³, N.S. Polikashina²

¹ Joint Institute for High Temperatures RAS,
Moscow

² Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements,
Moscow

³ JSC UGRK “Urantsvetmet”,
Moscow

melent_gb@mail.ru

Abstract

The problem of creating and supporting the production of lithium-ion batteries (LIA) in Russia includes an analysis of the possibilities of using domestic natural and “critical” materials. As Russia has the largest and most accessible sources of lithium raw materials, explored by the USSR geologists in the middle of the last century, we recommend for the priority industrial development the large deposits of rare-metal granite pegmatites, localized within two Precambrian crystalline shields of European Russia – in the Far North (the Kola Polar Region) and in the South (Novorossiia). The article provides a comparative assessment of the results of geological exploration (GE) and studies of these deposits, and recommendations for their additional study from a modern perspective, together with conditions and specifics of industrial development. Among the “critical” materials, the main attention is paid to lithium salts and high-quality graphite, while other metal ore products (Ni, Cu, Co, Al, Fe, etc.) are produced in our country in the required quantities, and in the future (with the exception of manganese) do not appear to be in short supply. For the first time, it is recommended to synchronize the additional study and industrial development of domestic lithium raw materials in the Far North and South, with surveys and prospective assessment of graphite raw materials in the same regions, the creation of mining, chemical and metallurgical production of a full technological cycle, and the program-targeted organization of a complex of scientific and production works as a strategic state order.

Keywords:

lithium energy, rare-metal pegmatites, spodumene, exploration, the Kola Region, Novorossiia, “critical” materials, graphite, prospective assessment, industrial development

Введение

Литий как компонент ядерного оружия в 50-е гг. прошлого столетия, затем – в период развития ядерной энергетики в мирных целях, а в настоящее время – в создании современных химических источников тока (далее – ХИТ) и накопителей (аккумуляторов) энергии, занял ведущее место среди остальных редких металлов, востребованных военными и гражданскими отраслями промышленности. В связи с открытием, разведкой и подсчетами запасов лития в последние 50–60 лет в десятках крупнейших месторождений мира с запасами от 1,0 до 11,0 млн т Li_2O в структуре его природных источников произошли серьезные изменения: наряду с рудами редкометалльных гранитных пегматитов со средними содержаниями 1,1–3,0 % Li_2O (магматогенный источник), за рубежом до 50 % лития стало производиться за счет эксплуатации обогащенных им рассолов и рапы высокогорных бессточных соляных озер Латинской Америки с содержаниями 0,06–0,5 % Li_2O (гидроминеральный источник). В настоящее время в мире производится и используется полный ассортимент литиевой товарной продукции как минеральной, так и химической. Из редкометалльного пегматитового сырья получают преобладающие минеральные концентраты сподумена $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$, в меньшей степени – петалита $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$ и лепидолита $\text{K}_2\text{Li}_2\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{20}(\text{F}, \text{OH})$, в минимальном количестве амблигонита LiAlPO_4F . При этом сподумен-литиевый пироксен (5,9–7,9 % Li_2O) преимущественно используется в производствах карбоната, гидроксида, хлорида, фторида и других солей лития, петалит-литиевый шпат (3,4–5,5 % Li_2O) и амблигонит как фторидный алюмофосфат лития (7,9 % Li_2O) – в специальных стекольных и керамических производствах, в том числе – непосредственно в виде минеральной шихты, а также в качестве добавок-флюсов в глинозем при выплавке алюминия.

Наиболее крупные месторождения литиевых пегматитов эксплуатируются в Австралии (Гринбушес), Китае (Jaijika, Gajika), США (Кингс-Маунтин и Бессемер-Сити в штате Королина) и др. Крупнейшие поля и жилы литиевых пегматитов выявлены в Афганистане, где отдельные жилы, согласно исследованиям Л.Н. Россовского, прослежены по простиранию на 3 км при мощности до 70 м [1].

В нашей стране в период 1941–1997 гг. на литий эксплуатировалось единственное Завитинское месторождение литиевых (сподуменовых) пегматитов в Восточном Забайкалье с исходными содержаниями порядка 0,5–0,6 % Li_2O , минимальными, сравнительно с другими, более крупными и качественными, разведанными в СССР месторождениями этого типа в Кольском, Восточно-Саянском регионах и Республике Тыве. Технология обогащения забайкальской литиевой руды включала декрипитацию сподумена при 1100 °С с переводом его в β -модификацию и последующую флотацию. За рубежом после декрипитации используется сернокислотный метод обработки литиевого полупродукта при $T = 250\text{--}300$ °С без дополнительного обогащения флотацией с получением сульфата лития, а затем, после обработки кальцинированной содой – карбоната лития как конечного товарного продукта. Сернокислотная переработка сподуменового сырья, включая богатую руду, применяется

в США как превосходящая другие методы и обеспечивающая извлечение 80 % лития.

С конца 1990-х гг. отсутствие собственной литиевой продукции в России из-за закрытия единственного рудника в Восточном Забайкалье частично компенсируется ее импортом.

Альтернативой закрытию производства сподуменовых концентратов в условиях «переходного периода», по нашему мнению, может стать промышленное освоение значительно более крупных и качественных по содержаниям лития и других редкометалльных компонентов пегматитовых месторождений Кольского региона, сосредоточенных в Воронья-Колмозерской зоне, которая представляется наиболее доступной сравнительно с другими разведанными месторождениями лития [2, 3].

В настоящей статье в развитие наших рекомендаций 2016–2022 гг. о необходимости первоочередного промышленного освоения литиевых месторождений Кольского региона [1–4] приводятся дополнительные геолого-экономические сведения о них как приоритетных источниках лития, так и сравнительные данные о подобных месторождениях Новороссии, разведанных в СССР российскими и украинскими геологами. Не меньший интерес в связи с необходимостью создания и развития отечественных производств литий-ионных аккумуляторов (далее – ЛИА) представляет ситуация с перспективами их обеспечения российским графитовым сырьем, используемым наряду с солями лития, в качестве «критически важного» материала в конструкциях ЛИА для электротранспорта.

Литиевое сырье Кольского Заполярья: объекты первоочередного освоения и долговременной эксплуатации

Редкометалльные гранитные пегматиты Кольского региона представлены наиболее крупным Колмозерским месторождением на юго-восточном фланге протяженной более чем на 100 км грабен-синклинальной зоны нижнепротерозойских магматогенно-метаморфических пород и менее крупным месторождением Васин-Мыльк на крайнем северо-западном фланге рассматриваемой зоны. Географически зона локализации этих месторождений простирается от среднего течения р. Воронья до оз. Колмозеро в верховьях р. Йоканьги, примерно в 50 км к северо-востоку от Ловозерского месторождения нефелиновых сиенитов, эксплуатируемого одноименным горно-обогательным комбинатом (далее – ГОК) на Та, Nb, TR, Ti. Все месторождения расположены в обводненной полярной тундре, на возвышенностях, и доступны как для вездеходного, так и водного транспорта. К северу от месторождения Васин-Мыльк находится Серебрянская гидроэлектростанция (далее – ГЭС) с плотиной на р. Вороньей, которая связана автодорогами в низовьях с пос. Туманным и селитебно-промышленными территориями г. Мурманска.

Месторождения редкометалльных пегматитов разведаны в 60-х гг. прошлого столетия на литиевое сырье с сопутствующими Та, Nb (Колмозеро и Полмостундра), а также Be, Cs, Rb, калиевополевошпатовое и слюдяное сырье (Васин-Мыльк). Геологическое и детальное минералого-геохимическое изучение этих месторождений осуществлено

в те же годы В.В. Гордиенко (Колмозеро) [5] и А.Ф. Соседко (Полмостундра) [6], а обогатимость редкометалльного сырья – В.К. Задорожным [7].

В период с 2016 г. по настоящее время в серии публикаций и докладах на Всероссийских научно-практических конференциях в городах Москве, Екатеринбурге, Сыктывкаре и Севастополе нами была обоснована приоритетность вовлечения в промышленное использование литиевого сырья Кольского Заполярья сравнительно с перспективами подобных месторождений редкометалльных пегматитов Восточных Саян в Иркутской области и нагорье Сангилен в Республике Тыве [8]. Эти месторождения, разведанные в 1960–1970-х гг., отличаются от кольских своей труднодоступностью в горно-таежных районах, включая бездорожье и отсутствие таких инфраструктурных факторов, как наличие электроэнергии, квалифицированных кадров горнорабочих, инженеров и техников, перерабатывающих предприятий горно-перерабатывающего комплекса (далее – ГПК) и т.д. Наш многолетний опыт изучения и комплексной оценки месторождений редкометалльных гранитных пегматитов в поисковых и горнопромышленных районах СССР, включая договорные работы с действующими ГОКа России и Восточного Казахстана, позволяет со всех позиций отдавать предпочтение Кольским месторождениям как объектам первоочередного промышленного освоения на литий.

Колмозерское месторождение представлено тремя жильными сериями редкометалльных пегматитов северо-западного простирания с крутым падением на юго-запад, обратном падению вмещающих метаморфических пород. Месторождение открыто в 1947 г. Протяженность жил варьирует от 200–300 м до 3 км, мощность – от 0,5–3 м до 40–60 м. Запасы лития при содержании 1,14 % Li_2O подсчитаны по категориям А + В + C_1 , C_2 и забалансовые; прогнозные ресурсы Р1 оценены в 152,6 тыс. т. Параметры запасов позволяют оценивать это месторождение в качестве крупнейшего в России – 18,9 % от общероссийских запасов литиевого сырья [9]. Содержания тантала 0,0091 % Ta_2O_5 как наиболее ценного сопутствующего компонента ниже уровня $\geq 0,01$ % как предельно допустимого в советское время для его промышленного извлечения из редкометалльных пегматитовых руд. Кроме того, преобладающее содержание ниобия над танталом (0,0114 % Nb_2O_5) свидетельствует о минеральной форме этих металлов в виде танталоколумбита, а не высокосортного ниоботанталита, что снижает суммарный показатель извлекаемой ценности колмозерского сырья. Добыча колмозерского редкометалльного сырья может на первой стадии осуществляться открытым способом, а в дальнейшем – исключительно подземным.

Месторождение Полмостундра, открытое в 1952 г., представлено жильной серией редкометалльных пегматитов северо-западного простирания с пологим падением на юго-запад. Среди 60 жил, сгруппированных на северо-западных (г. Полмос) и юго-восточных (горы Участковая и Дальняя) участках, пять жил являются продуктивными на литий. Жилы залегают в рассланцованных амфиболитах на юго-восточные месторождения. Они образуют кулисообразную зону протяженностью 3 км и шири-

ной 200 м. Согласно информации Росгеолфонда (2022), запасы лития при содержании 1,25 % Li_2O , подсчитанные по категории В, в 3,5 раза уступают подсчитанным по высшим категориям на Колмозерском месторождении, но сопоставимы по более низким категориям. Содержания тантала (0,0039 % Ta_2O_5) и ниобия (0,007 % Nb_2O_5) в руде значительно ниже колмозерских с преобладанием ниобия над танталом.

Литиевое сырье Полмостундры богаче колмозерского и может добываться исключительно открытым способом.

Месторождение Васин-Мыльк значительно уступает Полмостундровскому и особенно Колмозерскому по объемам рудной массы, но превосходит их по комплексности и качеству редкометалльного сырья, включая, помимо лития, высокие промышленные содержания тантала, цезия и рубидия. Это месторождение представлено тремя жилами протяженностью до 350 м при мощности от 3 до 14 м. Для главного рудного тела, в отличие от участково-полосчатых структур незональных полмостундровских и колмозерских жил, характерно зональное внутреннее строение. При этом каждая из трех зон представлена определенным видом сырья: внешняя – литиевым (сподуменовым) с Та, Nb, Ве, промежуточная (блоковая) – нерудным калиевополевошпатовым и внутренняя, наиболее ценная и продуктивная – тантал-цезий-литиевым с рубидием и бериллием. При разработке и обогащении этой высококомплексной редкометалльной руды, согласно исследованиям ее обогатимости в 1960-х гг. в Кольском НЦ РАН, могут быть получены следующие концентраты: сподуменовой (4,5–5,5 % Li_2O при извлечении 59–75 %), наиболее ценные собственно танталовые (танталит и микролит) при извлечении 45–53 % Ta_2O_5 , поллуцитовой рубидий-цезиевой при извлечении 57 % и берилловой (5–6 % ВеО при извлечении 35–60 %) [7]. Запасы этой богатой руды составляют 20 % от общих по месторождению и включают рудоразборные сподумен и поллуцит с попутными амблигонитом и лепидолитом.

Месторождение Васин-Мыльк, по мнению авторов, может быть отработано открытым способом, сезонно, без капитального строительства в период обустройства эксплуатационных участков на Полмостундровском и Колмозерском месторождениях.

Литиевое сырье Новороссии: перспективы вовлечения в промышленное освоение и комплексное использование

Месторождения редкометалльных гранитных пегматитов Украинского щита (далее – УЩ) разведываются с начала 1960-х гг. по настоящее время советскими и украинскими геологами в субширотной тектоно-магматической зоне Новороссии. Наиболее известными и изученными являются месторождения Крутая Балка в Приазовье, Шевченковское в Донецкой народной республике, на западе этой зоны – Полоховское и Станковитское-Добринское в Кировоградской области. Все месторождения расположены на территориях с преимущественно равнинным рельефом и перекрыты мощным чехлом осадочных пород и кор выветривания (до 100 м). Их обнаружение обусловлено развитием региональных геологических и геофизических исследований и поисково-оценочных работ с бурением

до глубины 500 м [10–13]. Результатом этих работ явилась как сравнительная оценка отдельных месторождений на литий и сопутствующие полезные компоненты, так и возможность их сопоставления с детально разведанными и изученными месторождениями литиевого сырья в Кольском Заполярье.

Месторождение редкометалльных гранитных пегматитов Крутая Балка обнаружено геологами треста «Артемгеология» в пределах протяженной Сорокинской тектонической зоны в 1967–1975 гг. на контакте метаморфических и метаморфизованных пород архея и нижнего протерозоя [11]. Месторождение площадью 146,69 га расположено в Бердянском районе Запорожской области, в 2,5 км юго-западнее с. Радивоновка и в 5,5 км севернее с. Осипенко, на правом берегу р. Берды, в непосредственной близости от автомагистралей. Жилы редкометалльных пегматитов обнажаются в крутом борту балки, представляющей собой грабен, преимущественно выполненный актинолит-тремолитовыми сланцами, участками – гнейсами, ультрабазитами и амфиболитами.

Жильные тела редкометалльных пегматитов на дневной поверхности и в разрезах по падению характеризуются небольшими размерами, линзовидной или неправильной формой, с ответвлениями и апофизами. По преобладающему минеральному составу пегматиты относятся к сподумен-альбитовому типу (с кварцем, мусковитом и микроклином). В экзоконтактах распространены скопления биотит-флогопита и големквистита (до 4,7 кг/т), обогащенных литием – соответственно до 1 % и 1,6–3,4 % Li_2O . Для внутреннего строения жильных пегматитов характерна неоднородность в распределении пороодо- и рудообразующих минералов как по составу, так и структурно-текстурным особенностям, в том числе – проявленная в зональности по мощности жил (от трех до пяти зон). Наиболее отчетливо эта зональность проявлена в увеличении количества мусковита, сподумена и кварца в направлениях от зальбандов к центру, вплоть до формирования мусковит- и сподумен-кварцевых зон и в осевой части жил – кварцевых ядер.

В соответствии с указанной спецификой внутреннего строения жил находится и распределение редких металлов по их мощности, изученное К.И. Розановым (ИМГРЭ Мингео АН СССР) совместно с украинскими коллегами [11]. Кроме лития (сподумен, трифилин, амблигонит), установлена закономерная концентрация в центральных зонах минералов тантала (от 24,7 до 148–381 г/т) и до 0,023 % Ta_2O_5 в кварц-мусковит-альбитовой зоне при соотношении $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Nb}_2\text{O}_5 = 2$, а также BeO (0,126 %), Rb_2O (0,16 %) и Cs_2O (0,04 %). Промышленная ценность редкометалльных пегматитов Крутой Балки определяется сподуменом и танталитом, т.е. их тантал-литиевой минералого-геохимической специализацией. По результатам предварительной разведки 1975 г. запасы ведущих редких и сопутствующих особо ценных компонентов утверждены Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых (далее – ГКЗ) СССР по категориям C_1 и C_2 . Кроме того, АО «ГИРЕДМЕТ» установлена пригодность молотых полевошпатовых, слюдяных и кварцевых концентратов для использования в стекольной, керамической, резинотехнической, лакокрасочной и дру-

гих отраслях промышленности. Количество сопутствующих нерудных концентратов без учета потерь при обогащении редкометалльного сырья оценивается: полевошпатовых – порядка 800 тыс. т, кварцевых – 580 тыс. т и слюдяных (литиево-мусковитовых) – более 200 тыс. т.

Месторождение Крутая Балка и результаты его предварительной оценки могут служить эталоном при поисках подобных объектов в пределах Сорокинской зоны и объектом ускоренного опытно-промышленного освоения без капитального строительства в Новороссии для восстановления и развития промышленных производств и гражданского строительства.

Месторождение редкометалльных гранитных пегматитов Шевченковское в Великоновосельновском районе Запорожской области на северо-восточной окраине пос. Шевченко в непосредственной близости (1 км) от двух автомобильных трасс. Площадь рудного участка – 39,84 га. Открыто в 1982 г. Новомосковской ГРЭ КП «Южургеология» при проведении глубинного геологического картирования [14].

Месторождение приурочено к северо-восточному обрамлению Западно-Приазовского блока УЩ, выполняя узкую моноклиналиную складку субмеридионального простирания с падением на запад под углами 60–90°.

Шевченковское месторождение представлено шестью пегматитовыми жилами, крутопадающими на запад под углами 65–88°. Месторождение локализовано в метаморфических породах архея – гнейсах и сланцах с выходами гранитов и мигматитов. Жильная зона редкометалльных пегматитов простирается в северном направлении на 1400 м при ширине 260–300 м, на глубину прослежена до 500–600 м. Разведанная площадь месторождения (0,8 км²) перекрыта мезокайнозойскими осадочными породами мощностью 70–120 м и непосредственно – корой выветривания мощностью до 35 м.

Микроклин-сподумен-альбитовые пегматитовые жилы характеризуются зональным внутренним строением с резким изменением мощности семи структурно-минералогических зон. Главные промышленно ценные минералы представлены преобладающим сподуменом и частично – петалитом, включая сосредоточенный в самостоятельной зоне. Кроме того, в жилах распространены литиевые слюды и фосфаты.

Содержания лития варьируют в пределах 0,3–4 %. Разведанные промышленные запасы лития подсчитаны и утверждены до глубины 500 м с сопутствующими танталом ниобием, бериллием, рубидием и оловом. Запасы литиевой руды категории C_1 составляют 5,67 млн т, категории C_2 – более 8 млн т [14]. Учтены также перспективы промышленного использования молотых нерудных, преимущественно полевошпатовых концентратов в стекольных производствах. Запасы кварца определены в 4,863 тыс. т, слюды – литиевого мусковита – в 527 тыс. т при средних содержаниях соответственно 25 и 6.

Горно-геологические условия эксплуатации месторождения определяют подземный способ добычи редкометалльного сырья с использованием подземных вод в качестве источника технического водоснабжения.

Запасы руд и полезных компонентов Шевченковского месторождения по результатам предварительной разведки (до 80 % в двух жилах мощностью 17–19 м) утверждены протоколом ГКЗ СССР № 10525 от 28.10.1988 г., а затем, специально по литиевому сырью, протоколом ГКЗ Украины № 4152–ДСК от 02.11.2017 г. (в качестве дополнения к протоколу ГКЗ СССР). Детальная разведка месторождения не проводилась.

Заявку на получение прав недропользователей Шевченковского месторождения в ноябре 2021 г. подали компании: австралийская European Lithium и китайская Chengxin Lithium. В то же время заинтересованность в промышленном освоении месторождения проявили США с учетом его близости к району запланированной разработки месторождения горючих сланцев с получением сланцевого газа компанией Burisma. В конце 2021 г. Украина начала выставлять на аукцион разрешения на разведку месторождений лития, меди, кобальта и никеля, т.е. «критических» металлов, необходимых для производства литиевых аккумуляторов.

Месторождение редкометалльных гранитных пегматитов Полоховское расположено в Новоукраинском районе Кировоградской области, в 12 км к северо-востоку от г. Смолино. Месторождение открыто в процессе прогнозно-геологических работ масштаба 1:50 000 на литий и золото и оценено в период с 1990 по 1993 г. бурением глубоких и картографических скважин на 500–600 м по сети 200–100×100–200 м в юго-западном экзоконтакте Корсунь-Новомирогородского плутона, в центре Ингульского мегаблока. В гнейсах и мигматитах бурением были вскрыты пегматоидные граниты с литиевой минерализацией и обрамляющие их редкометалльные пегматиты с петалитом, сподуменом и трифилином.

Жилы редкометалльных пегматитов представлены тремя зонами протяженностью от 200 до 550 м и прослежены по падению на 350–520 м. Жилы залегают в лейкократовых аплит-пегматоидных гранитах Полоховского массива, удлинённого (1200 м) в северо-западном направлении непосредственно в зоне его выклинивания [15].

Главным пороодообразующим минералом редкометалльных руд является петалит. Пегматиты представлены микроклин-петалит-альбитовым типом и характеризуются преобладающими мелкокристаллическими структурами. В петалите сосредоточено 95 % лития, что определяет необходимость разработки нетрадиционных схем переработки пегматитов с получением минерального концентрата для керамической промышленности и металлического лития.

Предварительная разведка Полоховского месторождения была выполнена в 2016 г. ООО «Укрлитий майнинг» за свой счет; в 2017–2018 гг. осуществлена детальная разведка с бурением глубоких скважин (1,8 тыс. пог. м) с подсчетом запасов литиевых руд категорий C_1 и C_2 в количестве 27,7 тыс. т. С 2019 г. геологоразведочные работы продолжались.

Полоховское месторождение обладает небольшими, но особо ценными запасами петалита, что отличает его от других, преимущественно сподуменовых руд региона.

Поле редкометалльных гранитных пегматитов Добра (или Добринское поле), представленное двумя участками

(месторождениями) – Станкуватским на севере и Надийским на юге, расположено в 65 км к юго-западу от Полоховского месторождения. Участки разделены безрудным интервалом в 600–700 м при общей протяженности субмеридионального жильного поля 4 км. Мощность жильной зоны – до 500 м; прослежена до глубины 500 м [16, 17].

Добринское поле редкометалльных пегматитов выявлено в 1985–1992 гг. и детально изучено в 1991–2001 гг. в процессе геолого-разведочных работ (далее – ГРП) масштаба 1:25 000. При этом были пробурены 23 разведочно-картировочные скважины и 49 наклонных глубоких скважин, а также создана сеть глубоких шурфов 800–400 × 200–100 м. Прослежены и оконтурены три рудные зоны, простирающиеся в субмеридиональном и северо-западном направлениях (340–355°) с падением на запад и юго-запад (65–78°). Протяженность зон: 1 – 2140 м, 2 – 2790 м, 3 – 2780 м. Жилы залегают в метаморфических породах – гнейсах и амфиболитах. Жильные серии включают 8–12 редкометалльных тел мощностью от ≤ 1 м до 50–60 м; наиболее крупные из них локализованы в осевой части жильных серий и прослежены по простиранию на 600–800 м.

Выделены три типа литиевых руд: преимущественно петалитовые, сподуменовые и смешанные, что позволяет сопоставить типы редкометалльных пегматитов Добринского месторождения с подобными им Полоховскими и Шевченковскими. Запасы редкометалльных руд оценены в 2018 г. в 100 тыс. т с перспективами увеличения их на глубину.

Добринское месторождение с геолого-экономических позиций представляется наиболее перспективным для промышленного освоения, но требует оценки возможностей получения петалитовых концентратов, а также выделения сопутствующих редкометалльных продуктов – танталовых, бериллиевых и оловянных, т.е. комплексной оценки суммарной извлекаемой ценности сырья.

Литиевые соли и графит как главные «критические» материалы производств ЛИА

Принципиальные конструкционные схемы литиевых химических источников тока (далее – ЛХИТ) включают металлический (сталь, алюминий) или пластиковый корпус, электроды – анод и катод, электролит и сепараторы. Анод состоит из слоистого графита, нанесенного на медную фольгу.

Основные материалы электродов, определяющие качественные характеристики ЛИА, представлены сложными оксидами лития: LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , LiFePO_4 , LiNiMnCoO_2 , LiNiCoAl_2 , $\text{LiTi}_5\text{O}_{12}$. Поиск новых соединений лития и «критически важных» материалов для анодов и катодов ЛИА развивается во многих странах мира. Эти соединения включают: LiMePO_4 ($\text{Me} = \text{Ni, Co, Cr, Mn}$), $\text{Li}_2\text{CoPO}_4\text{F}$, $\text{LiMn}_{2-x}\text{Me}_x\text{O}_4$ ($\text{Me} = \text{Mn, Co, Cr, Ni, Al}$), $\text{LiCo}_{1-x}\text{Me}_x\text{O}_2$ ($\text{Me} = \text{Ni, Cr, Al}$). Впервые использование LiCoO_2 в качестве катодов для аккумуляторов в 1980 г. предложил Джон Гуденар (США).

Это инновационно-технологическое направление НИР представляется весьма перспективным для стартапов как автономных малых предприятий, так и включенных в структуры крупных автопроизводителей, заинтересованных в производствах электротранспорта.

Электролиты представлены апротонными растворителями из смесей циклических и линейных карбонатов или эфиров. В их составах также селективно используются одномолярные концентрации солей лития – LiPF_6 , LiCl , LiAsF_6 , LiBF_4 [2]. Таким образом, наиболее ценными конструктивными компонентами ЛИА, обогащенными соединениями лития с Co, Ni, Mn, Fe, Al, Ti, обеспечивающими эффективность эксплуатации электротранспортных средств, являются электроды и электролиты, что обуславливает необходимость организации и масштабирования как их производства, так и рециклинга в нашей стране.

В частности, представляется перспективным использование в составе шихты для производства некоторых литиевых соединений природных минералов-концентраторов лития из пегматитов – например, амблигонита $\text{LiAlPO}_4(\text{F}, \text{OH})$ для получения литиевых фосфатов и фторидов, для которых в ЛИА характерны минимальная стоимость при максимальной безопасности.

Графит в производствах ЛИА представляет собой высокодефицитное нерудное сырье и «критический» материал. В анодах используется наиболее высококачественный, свободный от примесей, особо чистый крупночешуйчатый графит, чем обусловлены как его незначительная распространенность в минеральных образованиях, так и высокие издержки получения искусственного продукта необходимого качества. В России с начала – середины XIX в. известно месторождение Ботогол, открытое местными охотниками и рыбаками в горно-таежном районе Восточных Саян, и с 1847 г. послужившее объектом эксплуатации французским купцом Жан-Пьер Алибером [18]. Месторождение расположено на гольце высотой 2150–2312 м, в удалении от обжитых мест более чем на 100 км бездорожья, что обусловило sporadический вывоз сырья исключительно по речному зимнику. Площадь Ботогольского месторождения, приуроченного к контакту массива нефелиновых сиенитов с известняками и сланцами – $7 \times 3,5$ км; по падению субмеридиональные продуктивные тела прослежены до 25–50 м. Запасы графита учтены ГКЗ в объеме 38 тыс. т, хотя забалансовые оцениваются в сотни тысяч тонн. Эксплуатация месторождения осуществлялась периодически с перерывами: до 1917 г., в 1917–1959 гг. и с 1942 по 1952 г. В 1968 г. возобновлялись поисковые работы.

Известные физико-химические свойства графита обусловили его преимущественное использование в металлургии и сварке, производствах смазочных, химически стойких материалов и антифризов, в последние годы – графенов. Инновационным направлением явилось использование графита в анодах ЛИА, отмеченное в 2009 г. присуждением Нобелевской премии японскому инженеру.

Современное использование высококачественного графита в нашей стране осуществляется за счет импорта из Китая и стран Африки: согласно оценкам сотрудников Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского (ВИМС) в 2021 г. его количество составило 3,9 тыс. т стоимостью 1,557 дол/т (при общей добыче в 16,3 тыс. т/год).

Среди отечественных графитовых месторождений следует отметить Курейское в Красноярском крае как наибо-

лее крупное (79,6 млн т), эксплуатируемое с XIX в., и Союзное в Еврейской АО (Хабаровский край), подготавливаемое к освоению с 2011 г. Однако Курейское месторождение представлено плотным скрытокристаллическим графитом, расположено в 1500 км от обогатительной фабрики в г. Красноярске производительностью 20 тыс. т/год при извлечении 30–50 % и эксплуатируется два месяца в году в связи с ограничением сроков навигации на р. Енисей. В отличие от него Союзное месторождение представлено высококачественным графитом, добыча которого проектируется с 2014 г. [19]. Отсутствие инвестора на сегодняшний день оставляет в нераспределенном фонде графитовое сырье Мурзинского месторождения графита в Свердловской области.

Среди объектов поисково-оценочных работ на графит особый интерес представляет район северо-западного Приладожья в Карелии, где различными частными фирмами (ООО) оцениваются перспективы проявления мелкочешуйчатого графита в пределах Ихальского поля (месторождения) [19]. На участках этих работ прогнозируются запасы графита в количествах от 7 до 26 млн т по категориям $C_1 + C_2$ при содержаниях углерода ≥ 3 %. На участке Ихал-3 прогнозные ресурсы графита категории C_1 оцениваются в 124 млн т до глубины в 170 м, а запасы – в 81,4 млн т до глубины в 120 м при тех же средних содержаниях углерода [19]. В перспективе результаты ГРП на графит в Приладожье могут оцениваться с учетом опыта ГРП и эксплуатации подобных месторождений в соседних зарубежных странах: Норвегии (Skaland на о. Сенья), Швеции (Nunasvaara и Woxna) и Финляндии (Rautolampi и Kärysuo).

В Норвегии на о. Сенья находится крупнейший в Европе рудник Skaland, действующий с 1932 г. Докембрийские сланцы содержат залежи грубочешуйчатого графита высокого качества на площади 600×450 м при среднем содержании углерода 26 %. Запасы графитового сырья составляют 480 тыс. т. Основной потребитель – металлургия. Продуктивные тела представлены 8–10 субпараллельными пластинчатыми залежами длиной по простиранию 200 м при мощности 5–7 м. При поисках графитового сырья в Норвегии широко использовались аэроэлектромагнитные и наземные геофизические методы в сочетании с геологическими [19].

В Швеции графит традиционно с 1980-х гг. добывается на месторождении Крингель. Запасы крупночешуйчатого графитового сырья, оцененные до глубины 80 м, составляют 1,6 млн т и 2,9 млн т менее качественного. Всего добыто 254 тыс. т графита при максимальной ежегодной добыче 12 тыс. т. С 2011 г. рудник принадлежит канадской компании Flinders Resources (фабрика Woxna Graphite project) [19].

Испытаниями обогатимости норвежского графитового сырья установлено, что двухстадийной флотацией могут быть получены концентраты фракции +150 мкм с содержаниями 98,1 % Cpp при извлечении 98 %. В Швеции компанией Woxna Graphite AB значительно модернизирована обогатительная схема для месторождения Крингель, включенного в проект эксплуатации.

Примечательно, что в Финляндии в рамках проекта «Аккумуляторные минералы» (2019–2022) одновременно оценивается минеральный потенциал чешуйчатого графита, кобальта и лития. В этой стране известны два источника лития – сподуменовые пегматиты Кемие и Кангасала, представленные сравнительно небольшими месторождениями. Тем не менее Финляндия освоила использование литиевого сырья в производстве ЛИА (9 тыс. т).

Очевидно, что с геолого-экономических позиций следует обратить внимание на пространственную и, возможно, генетическую близость месторождений литиевых пегматитов и графита. Это характерно как для стран производителей и экспортеров сырья для ЛИА (Китай, Мозамбик и др.), так и российских регионов. Ботогольское месторождение графита расположено выше по течению реки разведанного среднемасштабного Урикского месторождения литиевых пегматитов. В Кольском регионе наряду с разведанными месторождениями литиевых пегматитов района Колмозеро-Воронья известны два месторождения крупночешуйчатого графита – горы Скалистая и Пестпакша. В Карелии с Ихальским полем графита ассоциирует известное, но не оцененное рудопроявление сподуменовых пегматитов в районе г. Сортавала и т.д. Эти два примера ориентируют на проведение в таких регионах геологических исследований, специализированных на выявление и кластерную оценку электроаккумуляторного сырья, что требует привлечения к таким работам соответствующих специалистов с организацией частно-государственного партнерства на стадиях поисков и ГРП. Кроме необходимых компетенций, рекомендуемая организация ГРП должна обеспечить устойчивость их финансирования на весь период проведения.

Заключение

Приведенные данные свидетельствуют о том, что Россия располагает достаточными и доступными с геолого-экономических позиций запасами и ресурсами литиевого сырья, технологическим опытом его обогащения в годы эксплуатации Первомайским ГОКом Завитинского месторождения сподуменовых пегматитов в Восточном Забайкалье, а также передельным опытом получения из сподумена химической продукции – карбоната и гидроксида лития и других соединений – Красноярским и Новосибирским заводами корпорации «ТВЭЛ». При этом особую ценность, наряду с зарубежными разработками, представляют результаты опережающих и сопровождающих научных исследований, специализированных на редкие металлы институтов Кольского филиала АН СССР, ВНИИХТ Минсредмаш СССР, ГИРЕДМЕТ Минцветмет СССР и др. Однако в настоящее время в начале большого пути воссоздания и развития в России литиевых производств полного технологического цикла на базе отечественного сырья необходимо определиться с содержанием и формами реализации стратегической государственной задачи импортозамещения в редкометалльной отрасли высокотехнологичного промышленного производства – от добычи и переработки сырья до создания тяговых и накопительных ЛИА для электротранспорта и других высокотехнологичных целей.

При выборе инвесторов принципиально важным является решение задачи о приоритетности спроса или предложения: как известно, специфика редкометалльной отрасли заключается в предпочтении предложения, формирующего спрос, в отличие от традиционного решения этой задачи, в пользу спроса в остальных «гражданских» сферах торгово-промышленной деятельности. Поэтому оперативное и эффективное решение проблемы лития в нашей стране представляется реальным только на *государственном* уровне, не исключая вариантов частно-государственного партнерства.

В феврале текущего 2023 г. «Роснедра» МПР РФ объявили аукцион на Колмозерское месторождение, в результате которого права на недропользование получило ООО «Полярный литий» – совместное предприятие «Атомредметзолото» «Росатома» и «ГМК Норильский никель». Первичный взнос составил 1,56 млрд руб. Ввод месторождения в эксплуатацию планируется к 2030 г., что должно обеспечить возможности выпуска в качестве конечной продукции до 45 тыс. т карбоната и гидроксида лития. Партнерам по эксплуатации Колмозера предстоит большая и ответственная работа по доизучению месторождения с переоценкой перспектив увеличения его запасов, включая решение наиболее сложных задач обустройства, обогащения сподуменовой руды и логистических проблем. Все это потребует привлечения специалистов-редкометаллистов различного профиля, компетентных в проблеме литиевого сырья и его переработке, а главное – проектной организации, обладающей опытом решения очевидных и сопутствующих задач промышленного освоения месторождений редкометалльного сырья. При этом следует иметь в виду, что по совокупности причин «переходного периода» в нашей стране прекращена деятельность ведущих горно-обогательных предприятий, эксплуатировавших месторождения редкометалльных пегматитов в Восточное Забайкалье (бывший Первомайский ГОК) и в Восточном Казахстане (Белогорский ГОК), а число высококвалифицированных научных и технических специалистов в силу естественных причин сократилось до первых единиц.

Рассматриваемая наукоемкая производственная сфера в условиях 30-летнего «переходного периода» включает и другие примеры свертывания инновационных программ и производств, обусловленные отсутствием необходимых компетенций у их организаторов. Как известно, в свое время осталась не реализованной широко разрекламированная программа Росатома ФЦП «ЛИБТОН» (литий, бериллий, тантал, олово, ниобий) в Забайкалье (2002–2005). Позднее, с 2016 г., не состоялось частичное реанимирование Завитинского литиевого рудника частной компанией «РМ Капитал» на базе складированных забалансовых и остаточных в недрах запасов сподуменовой руды [1]. Наконец, проекты госкорпорации «Роснано» по созданию ЛИА – завод «Лиотех» и ООО «Энергетические решения» в 2011–2014 гг. были признаны несостоятельными и приостановили свою деятельность [20].

На государственном уровне совещания 2016–2018 гг. по проблеме российского лития состоялись в Президиуме РАН и Минпромторге, а по более широкой проблеме ред-

ких металлов – в Комитете Совета Федерации по аграрно-продовольственной политике и природопользованию. В материалах последнего, в частности, было отмечено, что по непонятным причинам такие важные редкие элементы, как литий и бериллий выпали из Правительственной программы № 328 от 15.04.2014 г. «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности».

В 1990 г. СССР занимал 2-е место в мире после США по объемам производства лития – 1,4 тыс. т в пересчете на металл. Этого оказалось достаточно для ускоренной реализации не только атомного проекта, но и создания производств Li-Al и Li-Mg-х сплавов для аэрокосмической техники, литиевых ситаллов для спускаемых космических аппаратов и других высокотехнологичных отраслей промышленности. Однако мировое потребление лития в 2002–2005 гг. уже составляло 7,6–8,2 тыс. т, а в дальнейшем непрерывно увеличивалось до 30 % ежегодно, в последнее время за счет роста производств ЛИА.

Сейчас, в условиях преобладания концепций менеджмента и соответствующих кадров над горными инженерами-геологами и технологами, трудно представить возможности успешной промышленной реализации, как это отмечалось в 1940–1950-х гг., атомного проекта СССР такими кадрами, как общества с ограниченной ответственностью при недостаточно устойчивых источниках их финансирования.

Время не ждет. В связи с лавинообразным развитием электротранспорта в мире предложение пока не поспевает за спросом. В частности, Китай как лидер в этой отрасли изыскивает новые источники литиевого сырья в Австралии, Латинской Америке (гидроминеральное сырье), странах Африки, в Афганистане (сподумен), несмотря на наличие собственных ресурсов этих видов сырья. Мировое производство лития увеличилось до 200 тыс. т/год. В пересчете на карбонат спрос в 2022 г. оценивался правительством Австралии – лидером по добыче сподуменового сырья – в 745 тыс. т, а в 2023 г. – 915, в 2024 г. – 1,091 млн. т (таблица) [9].

Кроме рудного сподуменового сырья в России обсуждаются возможности и перспективы получения химических литиевых продуктов из техногенного гидротермального сырья [1]. Себестоимость добычи рудного сырья оценивается специалистами в 6–8 тыс. дол. за тонну, а гидроминерального – 2–3 тыс. дол., т.е. значительно выше. Однако при цене лития 70 тыс. дол. за тонну указанная разница в себестоимости не имеет определяющего значения. Кроме того, для извлечения лития из попутных вод нефтяных и газовых месторождений (Ковыктинского и др.) разработаны сложные сорбционные технологии, в то время как флотационно-гравитационные схемы обогащения сподуменовых руд и заводские передельные для получения из сподуменовых концентратов химических литиевых продуктов были разработаны еще в СССР и используются в настоящее время при переработке импортных минеральных концентратов.

С изложенных позиций представляется необходимым проявление государственной инициативы и политической воли в проведении под эгидой Российской академии наук, госкорпораций Ростех, Роскосмос, Росатом и др. межведомственного научно-технического совещания (конференции) в целях разработки целевой комплексной программы поэтапного решения проблемы лития в нашей стране в порядке госзаказа с контролем соблюдения сроков исполнения и финансирования ее этапов специализированным органом власти с привлечением компетентных научных специалистов.

Литература

1. Мелентьев, Г.Б. Литиевый потенциал России / Г.Б. Мелентьев // Редкие Земли. – 2016. – Вып. 2(7). – С. 150–163.
2. Мелентьев, Г.Б. Проблемы и перспективы создания российских производств литиевых автомобильных аккумуляторов (ЛИА) и их рециклинг / Г.Б. Мелентьев, Р.М. Шевчук, Л.М. Делицын, Е.С. Овчарова, Е.Н. Малинина // Актуальные проблемы, направления и механизмы развития производительных сил Севера – 2022: сбор-

Динамика мировой добычи лития в 2015–2021 гг., %

Dynamics of global lithium production in 2015–2021, %

Страна	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	Прирост в 2021 г., %	Прирост с 2011 по 2021 гг., %	Доля в 2021 г., %
Аргентина	3,6	5,8	5,7	6,4	6,3	5,9	6,0	1,4	7,3	5,6
Австралия	11,9	14,0	21,3	57,0	45,0	40,0	55,4	38,9	16,8	52,3
Бразилия	0,1	0,2	0,3	1,0	2,2	1,4	1,5	5,9	16,7	1,4
Чили	9,8	13,6	14,2	17,0	19,2	21,6	26,0	20,5	8,1	24,5
Китай	2,0	2,3	6,8	7,1	10,8	13,3	14,0	5,6	13,0	13,2
Португалия	0,3	0,4	0,8	1,2	0,9	0,3	0,9	159,5	4,8	0,8
США	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,3	-1,0	0,8
Зимбабве	0,9	1,0	0,8	1,6	1,2	0,4	1,2	188,6	9,8	1,1
Прочие страны	–	<0,05	0,1	3,0	0,4	0,1	0,1	27,2	–	0,1
Всего в мире	29,5	38,2	50,9	95,1	86,9	84,0	106,0	26,5	12,4	100,0

Источник: Геологическая служба США, Геологическая служба Великобритании, Британское агентство исследований и инноваций UKRI отчет World Mining Data. Темпы роста скорректированы на високосные годы.

Source: USA Geological Service, Geological Service of Great Britain, United Kingdom Research and Innovation (UKRI) World Mining Data Report. The growth rates are corrected for leap years.

- ник статей Восьмой Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) (21–23 сентября 2022 г., Сыктывкар): в 2 ч. – Иркутск: ООО «Максима», 2022. – Ч. I. – С. 296–306.
3. Мелентьев, Г.Б. Редкометалльный потенциал европейского Севера России и приоритеты его реализации: редкие щелочные и рассеянные металлы / Г.Б. Мелентьев, Л.М. Делицын // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии: сб. докл. российской конф. с междун. участием. Юшкинские чтения – 2020. 7–10 декабря 2020 г. – Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 2020. – С. 215–218.
 4. 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. докл. научно-практич. конф. с междун. участием и элементами школы молодых ученых. НИОКР – 2020, 6–9 октября 2020 г. – Екатеринбург: ИМЕТ УрО РАН, 2020. – С. 36–49.
 5. Гордиенко, В.В. Минералогия, геохимия и генезис сподуменовых пегматитов / В.В. Гордиенко. – Москва: Недра, 1970. – С. 239.
 6. Соседко, А.Ф. Материалы по минералогии и геохимии гранитных пегматитов / А.Ф. Соседко. – Москва: Госгеолтехиздат, 1961. – 154 с.
 7. Задорожный, В.К. Обогащение комплексных редкометалльных и керамических пегматитов / В.К. Задорожный // Обогащение руд и проблема безотходной технологии; под ред. чл.-корр. АН СССР И.А. Турчанинова. – Ленинград: Наука, 1980. – С. 76–96.
 8. Поля редкометалльных гранитных пегматитов / отв. ред. д.г.-м.н. М.В. Кузьменко. – Москва: Наука, 1976. – С. 23–29.
 9. Официальный сайт государственной корпорации по атомной энергии «Росатом». – URL: <https://rosatom.ru> (дата обращения: 11.03.2023).
 10. Кушев, В.Г. Сподуменовые пегматиты Украины / В.Г. Кушев. – ДАН СССР. – 1961. – Т. 138, № 4. – С. 928.
 11. Розанов, К.И. Редкометалльные пегматиты Украины / К.И. Розанов, Л.Ф. Лавриненко, В.С. Джунь // Сборник «Редкие» элементы (сырье и экономика). – Москва: ИМГРЭ, 1971. – Вып. 2. – С. 122–125.
 12. Галецкий, Л.С. Перспективы развития и использования минерально-сырьевой базы редких металлов Украины / Л.С. Галецкий // Стратегия использования и развития минерально-сырьевой базы редких металлов России в XXI веке: сб. тез. докл. Международного симпозиума. – Москва: ВИМС, ИМГРЭ, ГИРЕДМЕТ, ВНИИХТ, 1998. – С. 54, 55.
 13. Гурский, Д.С. Редкометалльно-редкоземельная сырьевая база Украины: состояние, прогноз, стратегия добычи, переработки и использования / Д.С. Гурский // Стратегия использования и развития минерально-сырьевой базы редких металлов России в XXI веке: сб. тез. докл. Международного симпозиума. – Москва: ВИМС, ИМГРЭ, ГИРЕДМЕТ, ВНИИХТ, 1998. – С. 56, 57.
 14. Исаков, Л.В. Предварительная разведка Шевченковского месторождения (центральная часть) 1984–1988 гг. Великоновосельковского района Донецкой обл. Украинской ССР, 1989 / Л.В. Исаков. – Фонды ГНПП «Геоинформ» Украины.
 15. Гейченко, М. Петрология руд Полоховского месторождения / М. Гейченко, А. Минасова, О. Билан. – Научные труды ИМГО, с. 101–1366–369 (на укр. яз.), 2021.
 16. Василенко, А.П. Пегматиты как источник редкометалльного и редкоземельного оруденения в пределах центральной и западной частей Украинского щита. Минеральные ресурсы Украины, 4 / А.П. Василенко, Л.В. Исаков. – С. 8–11.
 17. Vasylenko, A.P. Pegmatites as a source of rare-metal and rare-earth mineralization within the Central and Western parts of the Ukrainian shield / A.P. Vasylenko, L.V. Isakov // Mineral resources of Ukraine. – URL: <https://doi.org/10.31996/mru.2018.4.8-11> (дата обращения: 03.03.2023).
 18. Дело не в карандашах: сможет ли Россия закрыть свои потребности в графите? – URL: prometall.info/analitika/delo-ne-v-karandashakh (дата обращения: 11.03.2023).
 19. Щипцов, В.В. Минералого-технологические особенности графитовых руд Фенноскандинавского щита / В.В. Щипцов, Т.П. Бубнова, А.Г. Никифоров, П.В. Фролов // XIV Российский семинар по технологической минералогии: сб. статей, 5–6 апреля 2022 г., г. Петрозаводск. – Петрозаводск: Институт геологии Карельского НЦ РАН, 2022. – С. 16–23.
 20. Наумов, А.В. Литий – сверхвозможности металла / А.В. Наумов // Редкие Земли. – 2016. – Вып. 2(7). – С. 140–149.

References

1. Melentiev, G.B. Litiev'y`j potencial Rossii [Lithium potential of Russia] / G.B. Melentiev // «Redkie Zemli» [Rare Earths]. – Vol. 2(7). – 2016. – P. 150–163.
2. Melentiev, G.B. Problemy i perspektivy sozdaniya rossijskikh proizvodstv litiev'nykh avtomobil'nykh akkumulyatorov (LIA) i ih recikling [Problems and prospects of creating Russian production of lithium car batteries (LIA) and their recycling] / G.B. Melentiev, R.M. Shevchuk, L.M. Delitsyn, E.S. Ovcharova, E.N. Malinina // Aktual'nye problemy, napravleniya i mekhanizmy razvitiya proizvoditel'nykh sil Severa – 2022: Sbornik statej Vos'moj Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii (s mezhdunarodnym uchastiem) [Actual problems, directions and mechanisms for the development of the productive forces of the North – 2022: Collection of articles of the Eighth All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation) (September 21–23, 2022, Syktyvkar)]: 2 parts. – Irkutsk: OOO «Maksima», 2022. – Part I. – P. 296–306.
3. Melentiev, G.B. Redkometal'nyj potencial evropejskogo Severa Rossii i priority ego realizacii: redkie shchelochnye i rasseyannye metally [Rare metal potential of the

- European North of Russia and priorities for its implementation: rare alkali and trace metals] / G.B. Melentiev, L.M. Delitsyn // *Sovremennye problemy teoreticheskoy, eksperimental'noy i prikladnoy mineralogii: sb. dokl. Rossijskoj konf. s mezhdun. uchastiem. Yushkinskie chteniya* – 2020 [Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy: Sat. report Russian Conf. with intl. participation. Yushkin Readings – 2020. December 7–10], 2020 – Syktyvkar: Inst. of Geology Komi Scientific Center Ural Branch Russian Academy of Sciences, 2020. – P. 215–218.
4. Melentiev, G.B. Resursno-tekhnologicheskie problemy vossozdaniya i razvitiya rossijskih proizvodstv litiya i osobo cennyh rasseyannyh redkih metallov: sostoyanie i priority realizacii [Resource-technological problems of reconstruction and development of Russian production of lithium and especially valuable scattered rare metals: state and priorities of implementation] / G.B. Melentiev // *Perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroeniya s ispol'zovaniem zavershennyh fundamental'nyh issledovanij i NIOKR: sb. dokl. nauchno-praktich. konf. s mezhdun. uchastiem i elementami shkoly molodyh uchenyh. NIOKR* – 2020 [Prospects for the development of metallurgy and mechanical engineering using completed fundamental research and R&D: Sat. report scientific and practical. conf. with intl. participation and elements of the school of young scientists. R&D – 2020, October 6–9, 2020]. – Ekaterinburg: Inst. of Metallurgy and Materials Science Ural Branch Russian Academy of Sciences, 2020. – P. 36–49.
 5. Gordienko, V.V. Mineralogiya, geohimiya i genezis spodumenovyh pegmatitov [Mineralogy, geochemistry and genesis of spodumene pegmatites] / V.V. Gordienko. – Moscow: Nedra, 1970. – P. 239.
 6. Sosedko, A.F. Materialy po mineralogii i geohimii granitnyh pegmatitov [Materials on mineralogy and geochemistry of granite pegmatites] / A.F. Sosedko. – Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1961. – 154 p.
 7. Zadorozhny, V.K. Obogashchenie kompleksnyh redkometal'nyh i keramicheskikh pegmatitov [Enrichment of complex rare-metal and ceramic pegmatites] / V.K. Zadorozhny // *Obogashchenie rud i problema bezothodnoj tekhnologii* [Enrichment of ores and the problem of non-waste technology]; ed. corresponding member Academy of Sciences of the USSR I.A. Turchaninov. – Leningrad: Nauka, 1980. – P. 76–96.
 8. Polya redkometal'nyh granitnyh pegmatitov [Fields of rare-metal granite pegmatites]. – Moscow: Nauka, 1976. – P. 23–29.
 9. Oficial'nyj sajt gosudarstvennoj korporacii po atomnoj energii «Rosatom» [Official site of the state corporation for atomic energy «Rosatom»]. [Electronic resource]. URL: <https://rosatom.ru> (accessed on 11 March 2023).
 10. Kushev, V.G. Spodumenovye pegmatity Ukrainy [Spodumene pegmatites of Ukraine] / V.G. Kushev. – DAN USSR. – T. 138. – № 4. – 1961.
 11. Rozanov, K.I. Redkometal'nye pegmatity Ukrainy [Rare metal pegmatites of Ukraine] / K.I. Rozanov, L.F. Lavrinenko, V.S. June // *Sbornik «Redkie» elementy (syr'yo i ekonomika)* [Collection «Rare» elements (raw materials and economy)]. – Moscow: Inst. of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements. – Issue. 2 – 1971. – P. 122–125.
 12. Galetsky, L.S. Perspektivy razvitiya i ispol'zovaniya mineral'no-syr'evoy bazy redkih metallov Ukrainy [Prospects for the development and use of the mineral resource base of rare metals in Ukraine] / L.S. Galetsky // *Strategiya ispol'zovaniya i razvitiya mineral'no-syr'evoy bazy redkih metallov Rossii v XXI veke: Sb. tez. dokl. mezhdunarodnogo simpoziuma* [Strategy for the use and development of the mineral resource base of rare metals in Russia in the XXI century: Sat. abstract report international symposium]. – Moscow: All-Russian Scientific Research Inst. of Mineral Resources, Inst. of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, Institute «GIREDMET», Leading Scientific Research Inst. of Chemical Technology of the State Corporation «Rosatom», 1998. – P. 54–55.
 13. Gursky, D.S. Redkometal'no-redkozemel'naya syr'evaya baza Ukrainy: sostoyanie, prognoz, strategiya dobychi, pererabotki i ispol'zovaniya [Rare-metal-rare-earth raw material base of Ukraine: state, forecast, strategy of extraction, processing and use] / D.S. Gursky // *Strategiya ispol'zovaniya i razvitiya mineral'no-syr'evoy bazy redkih metallov Rossii v XXI veke: Sb. tez. dokl. mezhdunarodnogo simpoziuma* [Strategy for the use and development of the mineral resource base of rare metals in Russia in the XXI century: Sat. abstract report international symposium]. – Moscow: All-Russian Scientific Research Inst. of Mineral Resources, Inst. of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, Institute «GIREDMET», Leading Scientific Research Inst. of Chemical Technology of the State Corporation «Rosatom», 1998. – P. 56–57.
 14. Isakov, L.V. Predvaritel'naya razvedka Shevchenkovskogo mestorozhdeniya (central'naya chast') 1984–1988 gg. Velikonovossel'kovskogo rajona Doneckoj obl. Ukrainskoj SSR, 1989 [Preliminary exploration of the Shevchenkovskoye field (central part) 1984–1988 Velikonovossel'kovsky district, Donetsk region Ukrainian SSR, 1989] / L.V. Isakov. – Funds of the State Scientific and Production Enterprise «Geoinform» of Ukraine.
 15. Geichenko, M. Petrologiya rud Polohovskogo mestorozhdeniya [Petrology of ores of the Polokhovskoye deposit] / M. Geichenko, A. Minasova, O. Bilan. – Scientific works of IMHO, p. 101–1.366–369 (in Ukrainian), 2021.
 16. Vasilenko, A.P. Pegmatity kak istochnik redkometal'nogo i redkozemel'nogo orudneniya v predelah central'noj i zapadnoj chastej Ukrainy [Pegmatites as a source of rare-metal and rare-earth mineralization within the central and western parts of the Ukrainian shield. Mineral resources of Ukraine, 4] / A.P. Vasilenko, L.V. Isakov. – P. 8–11.
 17. Vasylenko, A.P. Pegmatites as a source of rare-metal and rare-earth mineralization within the Central and Western parts of the Ukrainian shield / A.P. Vasylenko, L.V. Isakov // *Mineral resources of Ukraine*. [Electronic resource]. URL:

<https://doi.org/10.31996/mru.2018.4.8-11> (accessed on 3 March 2023).

18. Delo ne v karandashah: smozhet li Rossiya zakryt' svoi potrebnosti v grafite? [It's not about pencils: will Russia be able to cover its needs for graphite?] [Electronic resource]. URL: prometall.info/analitika/delo-ne-v-karandashakh (accessed on 11 March 2023).
19. Shchiptsov, V.V. Mineralogo-tekhnologicheskie osobennosti grafitovykh rud Fenno-skandinavskogo shchita [Mineralogical and technological features of graphite ores of the Fenno-Scandinavian shield] / V.V. Shchiptsov, T.P. Bubnova, A.G. Nikiforov, P.V. Frolov // XIV Rossijskij seminar po tekhnologicheskoy mineralogii: sb. statej [XIV Russian Seminar on Technological Mineralogy. Sat. articles, April 5–6, 2022, Petrozavodsk]. – Petrozavodsk: Institute of Geology Karelian Scientific Center Russian Academy of Sciences, 2022. – P. 16–23.
20. Naumov, A.V. Litij – sverhvozmozhnosti metalla [Lithium – superpowers of metal] / A.V. Naumov // «Rare Earths». – Vol. 2(7). – 2016. – P. 140–149.

Информация об авторах:

Мелентьев Гелий Борисович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН) (Российская Федерация, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2; e-mail: melent_gb@mail.ru).

Шевчук Роман Михайлович – инженер-эколог, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН) (Российская Федерация, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2; e-mail: Roman-Shevchuk@yahoo.com).

Делицын Леонид Михайлович – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН); Scopus Author ID:6603175353 (Российская Федерация, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2; e-mail: delitzin@ihed.ras.ru).

Малинина Елена Николаевна – зав. лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ФГБУ ИМГРЭ) (Российская Федерация, 121357, г. Москва, ул. Вересаева, д. 15; e-mail: en-malinina@yandex.ru).

Овcharова Елена Сергеевна – главный геолог, АО УГРК «Уранцветмет»; Scopus Author ID:57209009876 (Российская Федерация, 143421, Московская область, Красногорский район, Новорижское шоссе 9 км, бизнес-центр «РИГА ЛЭНД»; e-mail: ovcharova_e@mail.ru).

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

About the authors:

Geliy B. Melentiev – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Joint Institute for High Temperatures (JIHT) RAS (Federal State Budgetary Institution of Science Institute for High Temperatures (JIHT) of the Russian Academy of Sciences; House 13, Building 2 Izhorskaya Street, Moscow, Russian Federation, 125412; e-mail: melent_gb@mail.ru).

Roman M. Shevchuk – Environmental Engineer, Joint Institute for High Temperatures (JIHT) RAS (Federal State Budgetary Institution of Science Institute for High Temperatures (JIHT) of the Russian Academy of Sciences; House 13, Building 2 Izhorskaya Street, Moscow, Russian Federation, 125412; e-mail: Roman-Shevchuk@yahoo.com).

Leonid M. Delitsyn – Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy), Chief Researcher, Scopus Author ID:6603175353, Joint Institute for High Temperatures (JIHT) RAS (Federal State Budgetary Institution of Science Institute for High Temperatures (JIHT) of the Russian Academy of Sciences; House 13, Building 2 Izhorskaya Street, Moscow, Russian Federation, 125412; e-mail: delitzin@ihed.ras.ru).

Elena N. Malinina – Laboratory Head, Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, (Federal State Budgetary Institution Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements; Building 15, Veresaeva Street, Moscow, Russian Federation, 121357; e-mail: en-malinina@yandex.ru).

Elena S. Ovcharova – Chief Geologist, JSC UGRK “Urantsvetmet”; Scopus Author ID:57209009876 Business Centre “RIGA LAND”, Novorizhskoe highway 9 km, Krasnogorsk District, Moscow Region, Russian Federation, 143421; e-mail: ovcharova_e@mail.ru).

Nina S. Polikashina – Researcher, Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements (Federal State Budgetary Institution Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements; Building 15, Veresaeva Street, Moscow, Russian Federation, 121357; e-mail: polikashinanina@yandex.ru).

Для цитирования:

Мелентьев, Г.Б. Приоритетные минеральные ресурсы и «критические» материалы России для производства литий-ионных аккумуляторов / Г.Б. Мелентьев, Р.М. Шевчук, Л.М. Делицын, Е.Н. Малинина, Е.С. Овчарова, Н.С. Поликашина // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экономические науки». – 2023. – № 3 (61). – С. 59–70.

For citation:

Melentiev, G.B. Prioritetnye mineralnye resursy i "kriticheskie" materialy Rossii dlya proizvodstva litij-ionnyh akkumulyatorov [Priority mineral resources and «critical» materials of Russia for production of lithium-ion batteries] / G.B. Melentiev, R.M. Shevchuk, L.M. Delitsyn, E.N. Malinina, E.S. Ovcharova, N.S. Polikashina // Proceedings of the Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Economic Sciences". – 2023. – № 3 (61). – P. 59–70.

Дата поступления статьи: 17.04.2023

Прошла рецензирование: 02.05.2023

Принято решение о публикации: 30.05.2023

Received: 17.04.2023

Reviewed: 02.05.2023

Accepted: 30.05.2023