

ЛИТИЙ-ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА И СУПЕРКОНДЕНСАТОРЫ

LITHIUM-ION CURRENT SOURCES AND SUPERCAPACITOR

Статья поступила в редакцию 21.03.18. Ред. рег. № 2654

The article has entered in publishing office 21.03.18. Ed. reg. No. 2654

УДК 546.34+553.044

**ЛИТИЙ: РЕСУРСЫ, ДОБЫЧА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
МИРОВОГО РЫНКА\***

*П.Г. Кудрявцев, Н.П. Кудрявцев*

Polymate Ltd – Израильский исследовательский центр  
п/я 73, Migdal HaEmek, 2310001, Израиль  
тел.: +972(52)726-56-47; факс: +972(4)604-21-75; email: pgkudr89@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.070-081

Заключение совета рецензентов: 28.03.18 Заключение совета экспертов: 06.04.18 Принято к публикации: 10.04.18

В настоящее время литий характеризуется одними из самых быстрых темпов роста цены, потребления и объемов добычи. Проведена оценка темпов потребления, роста объемов добычи и разведанных объемов литиевых минеральных ресурсов. Дан прогноз развития мирового литиевого рынка, роста добычи лития и динамики цен. Так, увеличение мировых объемов добычи лития к 2020 г. должно превысить 12 000 тонн в год. Показано, что рост потребления лития стимулировал рост геологической разведки его минеральных ресурсов и привёл к резкому росту разведанных запасов лития. Предпринята попытка оценить другие минеральные ресурсы, в том числе с низким содержанием лития. Анализ продемонстрировал, что в соответствии с существующими технологиями и скоростью роста производства лития литиевые руды закончатся примерно через 25 лет, а литиевые запасы разведанных ресурсов, связанные с соляными озерами, истощатся примерно через 50 лет. В статье предложено несколько путей решения этой проблемы. Первый – увеличение степени извлечения лития из существующих сырьевых источников, то есть применение более эффективных методов. Второй – использование бедных по литию ресурсов, таких как подземные рассолы и попутные нефтяные воды, которые могут стать самым перспективным источником лития (были показаны возможные направления и перспективы добычи). Третий – использование вторичных литиевых ресурсов и переработка отработанных литиевых батарей.

Ключевые слова: литий; рынок лития; мировые запасы лития; добыча лития; подземные рассолы; попутные нефтяные воды.

**LITHIUM: RESOURCES, PRODUCTION AND PROSPECTS  
OF WORLD MARKET DEVELOPMENT**

*P.G. Kudryavtsev, N.P. Kudryavtsev*

Polymate Ltd – Israel Nanotechnology Research Center  
POBox 73, Migdal HaEmek 2310001, Israel  
tel.: +972 (52) 726-56-47, fax: +972 (4) 604-21-75, e-mail: pgkudr89@gmail.com

\*Кудрявцев П.Г., Кудрявцев Н.П. Литий: ресурсы, добыча и перспективы развития мирового рынка // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(10-12):70-81.

The paper deals with lithium which is currently characterized by one of the fastest growth rates in terms of price, consumption and production volumes. We have estimated the rates of consumption, the growth in production volumes and the growth of the explored volumes of lithium mineral resources and have given forecast of development of the world lithium market, growth of lithium production and price dynamics. Thus, the increase in world production of lithium by 2020 should exceed 12,000 tons per year. The increase in the consumption of lithium is shown to stimulate the growth of geological exploration of its mineral resources and to lead to a sharp increase in the explored lithium reserves. Moreover, we have attempted to evaluate other lithium mineral resources including those with a low content of lithium. The analysis demonstrate that, in accordance with existing technologies and speed of the lithium production growth, lithium ore will run out in about 25 years, and lithium reserves of proven resources associated with salt lakes will be depleted in about 50 years.

The paper suggests several ways of solving this problem. The first one is an increase in the extraction of lithium from existing sources of raw materials, that is, the use of more effective methods. The second one is the use of lean lithium resources, such as underground brines and associated oil waters which can become the most promising source of lithium (the possible directions and prospects of extraction have been shown). The third way is the use of secondary lithium resources and the processing of spent lithium batteries.

Keywords: lithium; lithium market; world reserves of lithium; lithium mining; underground brines; associated oil waters.



Павел Геннадьевич  
Кудрявцев  
Pavel Kudryavtsev

**Сведения об авторе:** канд. хим. наук, профессор, старший научный сотрудник, академик МАНЭБ, академик РАЕН, ведущий научный сотрудник Polymate – Israel Nanotechnology Research Center (Израиль); член редакционных коллегий журналов: Scientific Israel – Technological Advantages (Израиль), Innovations in Corrosion and Materials Science (США).

**Награды:** медаль им. М.В. Ломоносова; кавалер ордена «Звезда Ученого»; почетное звание «Заслуженный деятель науки»; медаль П.А. Столыпина и почетный бриллиантовый знак Торгово-промышленной палаты РФ.

**Образование:** Пермский политехнический институт (1977 г.).

**Область научных интересов:** разработка золь-гель технологии получения неорганических нанокompозитов с регулируемым комплексом физико-химических свойств; извлечение редких и рассеянных элементов из сложных по составу природных и технологических растворов; разработка технологии получения и создание опытно-промышленных и малотоннажных промышленных установок для производства элементоорганических соединений.

**Публикации:** более 240, в том числе 4 монографии, 35 патента.

ORCID: 0000-0002-0729-0958

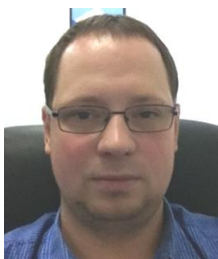
**Information about the author:** Ph.D. in Chemistry, Professor, Senior Researcher, Academician of IAELPS, Academician of RANS, Leading Researcher of Polymate – Israel Nanotechnology Research Center (Israel); a member of the Editorial Boards of journals: Scientific Israel – Technological Advantages (Israel), Innovations in Corrosion and Materials Science (USA).

**Awards:** the M.V. Lomonosov medal; Commander of the Order “The Star of the Scientist”; the honorary title “Honored Worker of Science”; the medal of P.A. Stolypin, and honorable diamond sign of the Chamber of Commerce and Industry of the Russian Federation.

**Education:** Perm Polytechnic Institute, 1977.

**Research interests:** development of sol-gel technology for inorganic nanocomposite materials with a controlled complex for physical and chemical properties; extraction of rare and trace elements from the complex composition of natural and technological solutions; development of technology for new materials, and creation of pilot and small-tonnage industrial plants for the production of organoelement compounds.

**Publications:** 240 including 4 books, and 35 patents.



Николай Павлович  
Кудрявцев  
Nikolai Kudryavtsev

**Сведения об авторе:** инженер-исследователь Polymate LTD, Хайфа, Израиль.

**Образование:** Пермский государственный технический университет.

**Область научных интересов:** разработка технологии получения и создание опытно-промышленных и малотоннажных промышленных установок для производства органических и неорганических солей, сложных эфиров и проч.

**Публикации:** 5.

**Information about the author:** Research Engineer in Polymate LTD, Israel, Holon.

**Education:** Perm State Technical University.

**Research interests:** development of technology for new materials and creation of pilot and small-tonnage industrial plants for the production of organic and inorganic salts, esters and etc.

**Publications:** 5.

## 1. Введение

Литий – элемент XXI века. В работах [1, 2] были рассмотрены наиболее важные области применения лития и его соединений, большинство которых относится к энергетике, в первую очередь системам хранения энергии. В статье [3] были показаны основные методы добычи этого минерала из различных видов сырья. Задачи данного исследования заключаются в анализе динамики рынка, оценки общих запасов и перспектив добычи и потребления лития, а также рециркуляции и добычи лития из вторичных источников, поскольку рост потребления литиевых батарей неуклонно возрастает.

Исторически литий добывается из двух разных источников – континентальных рассолов и минералов твердых пород. В Чили, являющихся ведущими мировыми производителями карбоната лития, литий добывается из двух рассольных озер на Салар-де-Атакама (Salar de Atacama) в Андах. Концентрированные рассолы транспортируются в Антофагасту, на побережье Чили, и перерабатываются на двух заводах в карбонат лития: на одном заводе производится металлический литий, а на другом – гидроксид лития. Литий добывают и в других странах. Так, в Аргентине в Андах карбонат лития и хлорид лития также получают из рассолов – Salar del Hombre Muerto. Следует отметить, что большая доля карбоната лития, произведенного в Южной Америке, экспортируется в Соединенные Штаты. Австралия является ведущим производителем литиевых минеральных концентратов. Бразилия, Китай, Португалия и Зимбабве также производят значительное количество этих концентратов, большинство которых используется непосредственно в производстве керамики и стекла. При этом Китай – единственная страна, которая производит большое количество карбоната лития и гидроксида лития из минеральных концентратов, главным образом из сподумена, импортируемого из Австралии. Кроме того, в Китае карбонат лития получают из рассолов соленого озера Забаю (Zabayu) в Тибетском автономном районе Сицзан, а

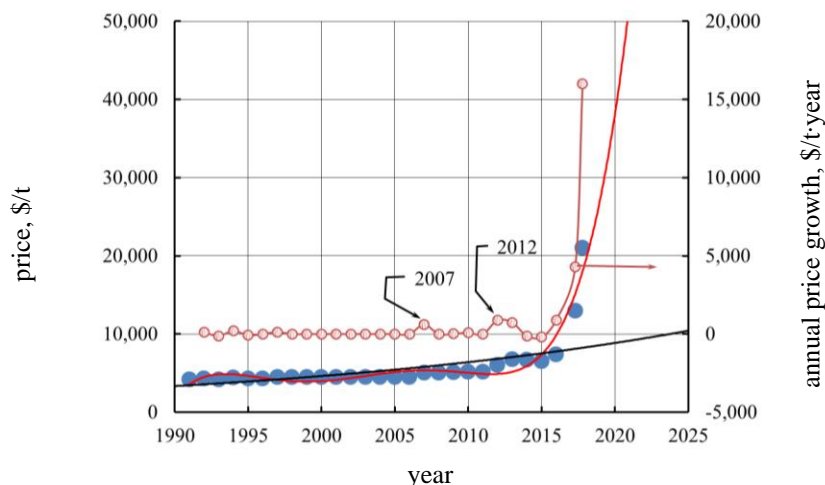
также из солей озера Дунтай (Dongtai) и Соляного озера Ситаи-Хиньяер (Xitai Jinaier Salt Lake) в провинции Цинхай [1, 2].

Спрос на литий продолжит расти по мере того, как транспортные средства будут становиться более «зелеными», а электричество – экологичным. Это подтвердили аналитики одного из крупнейших в мире инвестиционных банков Goldman Sachs в декабре прошлого года, заявив, что литий («новый бензин») – это выгодный товар, который легко хранить и который станет «ключевым фактором революции в электромобилестроении» [4–6]. В настоящее время мировые продажи литиевых солей составляют около 1 млрд долларов в год – этот элемент стал важнейшим компонентом литий-ионных батарей, которые теперь питают все: от электромобилей до электроинструментов и смартфонов. По прогнозам в течение следующих восьми лет спрос на литий вырастет более чем на 300 % [7], потому, в частности, что все крупные электротехнические компании расширяют мощности по производству солнечной энергии, для хранения которой требуются литий-ионные батареи с высокой плотностью энергии. Например, Duke Energy недавно остановила работы по строительству атомной электростанции во Флориде и вместо этого планирует инвестировать в солнечную энергетику и аккумуляторы 6 млрд долларов [8]. Растущий спрос на аккумуляторные батареи и необходимость хранения энергии с высокой плотностью создают серьезную зависимость многих отраслей мировой промышленности от лития, что в свою очередь вызывает глобальный поиск новых литиевых источников.

## 2. Анализ цен на литий

Наиболее важной характеристикой рынка лития является цена на основной литиевый продукт – карбонат лития  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , имеющий основное хождение на мировых рынках. Динамика этой цены представлена на рис. 1.





**Рис. 1** – Динамика и прогноз средней мировой цены на карбонат лития батарейного сорта и ее ежегодный прирост [9]: точки – данные; черная прямая – линейная аппроксимация; красная кривая – полиномиальная аппроксимация  
**Fig. 1** – Dynamics and forecast of the average world price for lithium carbonate of battery qualification and its annual increase [9]: points are data; black line – linear approximation; the red curve – a polynomial approximation

После падения цен на литий в начале 2016 г. уже в конце того же года наблюдался резкий скачок цен. Так, в Китае на условиях спотовой цены (Spot Price) карбонат лития торговался по 14 500 US\$ за тонну [10]. Согласно официальным источникам, минимальная цена на карбонат лития в начале 2017 г. была зафиксирована в районе 13 400 ÷ 14 500 US\$ за тонну. Однако, по некоторым неподтвержденным сведениям, трейдеры Китая и Индии продавали карбонат лития в пределах 24 ÷ 28 US\$ за килограмм.

При этом в качестве примера можно привести следующие данные:

- 1) май 2017 г. – 15 500 US\$/т [11];
- 2) конец 1 квартала 2016 г. – на карбонат лития (99 % чистоты) более 7 000 US\$/т (Китай), а в июле 2016 г. – более 20 000 US\$/т [12];
- 3) ноябрь 2016 г. – 16,3 US\$/кг, 16 000 US\$/т (Индия) [13];
- 4) апрель 2017 г. – 15 500 US\$/т [14];
- 5) к концу 2017 г. примерно 24 700 US\$/т (Китай) [15].

Поскольку цена на карбонат лития может меняться в различных пределах, в зависимости от договоренностей между продавцом и покупателем, в некоторых случаях цена может быть и выше.

В соответствии с этими данными авторы настоящей статьи сделали прогноз цен на карбонат лития до 2020 г. (см. рис. 1), который составил 40 000 ÷ 45 000 US\$ за тонну. С учётом колебаний рынка и с помощью статистических методов можно примерно оценить минимальную и максимальную цену на карбонат лития к 2020 г.: минимальная – 30 000 US\$/тонна; максимальная – 50 000 US\$/тонна. В дальнейших расчетах будем опираться на базовую цену 2016 г. и минимальную цену карбоната лития к 2020 г.

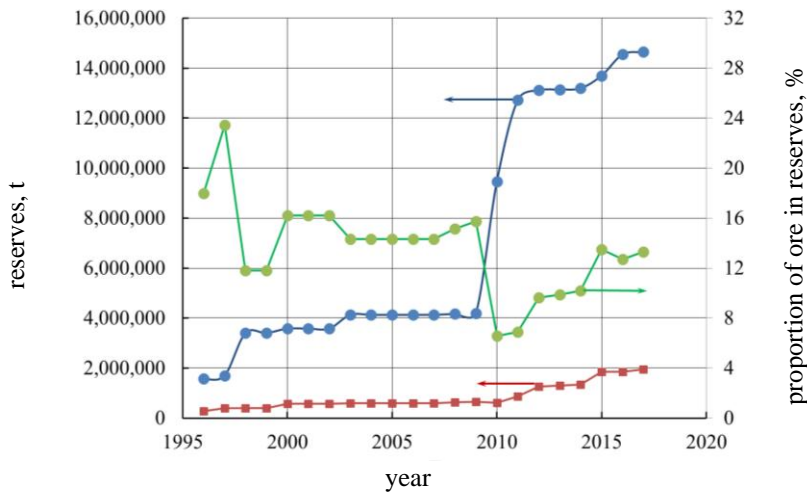
### 3. Мировые ресурсы и добыча лития

Результаты анализа изменений мировых запасов лития за последние 20 лет получены на основе официальных государственных источников стран, которые имеют литиевые запасы (рис. 2). Здесь следует особо оговорить, что рудные запасы лития представлены следующими минералами: сподумен, амблигонит, эвкрипит, лепидолит и петалит, – которые составляют литиевых ресурсы следующих стран: США, Австралия, Бразилия, Канада, Намибия, Португалия, Россия и Зимбабве. Однако в итоговый результат не включены сведения по литиевым ресурсам России и Намибии и по гидроминеральным ресурсам США и России ввиду отсутствия официальных данных.

На рис. 2 наглядно показано, что объемы резервов лития растут вместе со спросом. Так, первый скачок объема ресурсов в 1998 г. был обусловлен появлением дополнительного спроса на литий из-за необходимости обеспечить рост производства аккумуляторов для телефонов и других мобильных устройств и изменения оценки литиевых ресурсов в Чили. Затем в 2000 г. Австралия увеличила оценку своих запасов сподумена, что привело к росту доли минеральной составляющей общих резервов лития. После этого ситуация оставалась неизменной до 2009 г. включительно.

Рост объема запасов в 2010–2012 г. определялся резким ростом мировой потребности в автомобильных литиевых аккумуляторах. Кроме того, в это время наблюдался некоторый рост цены на литий (см. рис. 1), что также явилось поводом для активизации работ по геологоразведке литиевых месторождений. Основной вклад в этот рост внесли две страны Чили и Китай; небольшой в 2016 г. – Аргентина; а Бразилия, напротив, сократила оценку своих резервов в 4 раза.

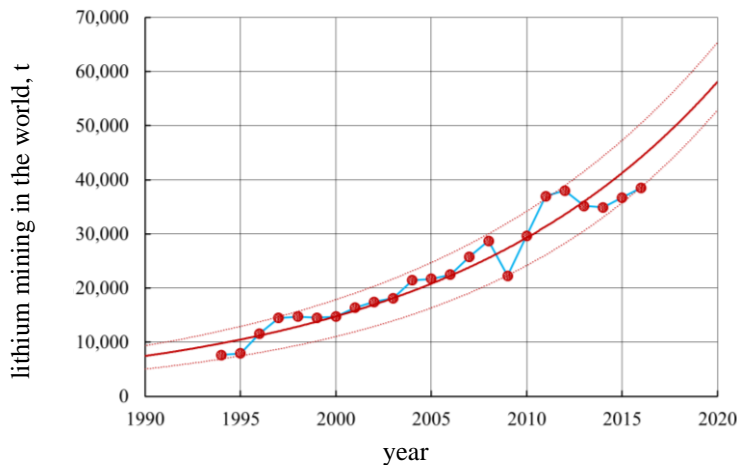




**Рис. 2** – Объем запасов литиевого сырья в мире: синяя кривая – общие данные всех литиевых сырьевых источников; коричневая кривая – запасы литиевых руд (сподумена, амблигонита, эвкриптита, лепидолита и петалита); зеленая кривая – доля литиевых руд в мировых запасах литиевого сырья  
**Fig. 2** – The volume of reserves of lithium resources in the world: blue curve – General Data of lithium raw material sources; brown curve – reserves of lithium ore (spodumene, ambligonite, eucryptite, lepidolite and petalite); green curve – the share of lithium ores in the world's reserves of lithium raw materials

При этом следует учитывать, что если рост резервов происходит скачками, то рост добычи лития меняется плавно. Данные по мировой добыче лития представлены на рис. 3. Анализ этих данных свидетельствует о том, что рост добычи лития изменяется

по экспоненциальному закону. Некоторое падение добычи в 2009 г. было обусловлено мировым кризисом, начавшимся в 2008 г. Это падение носило локальный характер и было с избытком компенсировано дополнительным ростом добычи к 2011 г.



**Рис. 3** – Объем и прогноз мировой добычи лития к 2020 г.: точки – фактические данные; пунктирные кривые – доверительный интервал с 95 % вероятностью  
**Fig. 3** – Worldwide lithium production and forecast by 2020: points – actual data; dotted curves – a confidence interval with a 95% probability

Исходя из темпов роста добычи лития, можно спрогнозировать уровень мировых объемов производства лития к 2020 г. По средним оценкам уровень добычи составит 58 000 тонн лития в год, по пессимистичным – 52 тонн. Таким образом, увеличение мировых объемов добычи лития к 2020 г. должно превысить 12 000 тонн в год. На основе данных, представленных на рис. 2 и 3, и с учетом полиномов 2-й степени, аппроксимирующих эти зависимости, можно примерно рассчитать время истощения имеющихся и перспективных разведанных запасов лития. Расчеты, проведенные в соответствии с существующими технологиями и скоростью роста производства лития, показывают, что литиевые руды закончатся примерно через 25 лет, а литиевые запасы

разведанных ресурсов, связанные с соляными озерами, закончатся примерно через 50 лет. Отсюда перспективными становятся запасы лития, сосредоточенные в подземных водах, в том числе попутных нефтяных. Кроме того, несмотря на то что сегодня не существует технологий, способных обеспечить экономически рентабельное извлечение лития из морской воды, в отдаленной перспективе его можно будет добывать из вод Мирового океана.

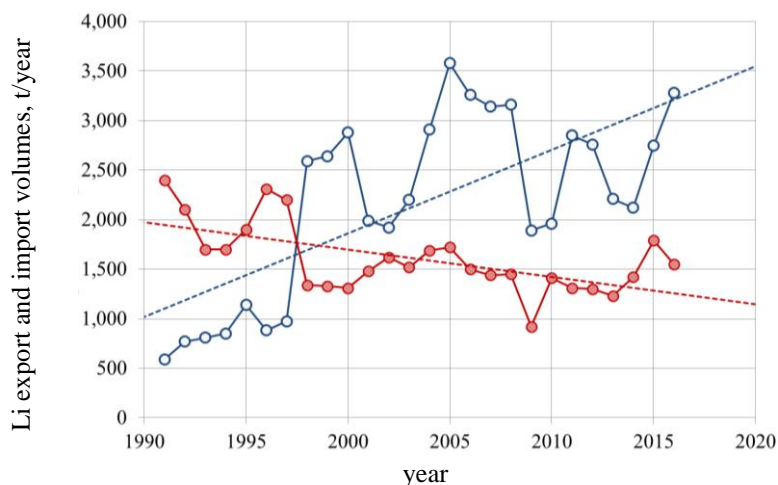
### 3.1. Добыча и переработка лития и его соединений в США

В США литий добывают только на рассоле в штате Невада. Две американские компании (Albemarle Co и FMC Co) производят большое коли-



чество литиевых соединений из отечественного и импортного сырья. В качестве сырья используются карбонат лития, хлорид лития и гидроксид лития. Геологическая служба США не публикует сведений по внутреннему производству лития и его соединений, обосновывая это защитой запатентованных данных. Однако авторы настоящей статьи на базе данных по объемам экспорта и импорта лития и его соединений в США (рис. 4), опубликованных Геологической службой США, попытались восстановить информацию по добыче и внутреннему потреблению лития всеми отраслями промышленности США.

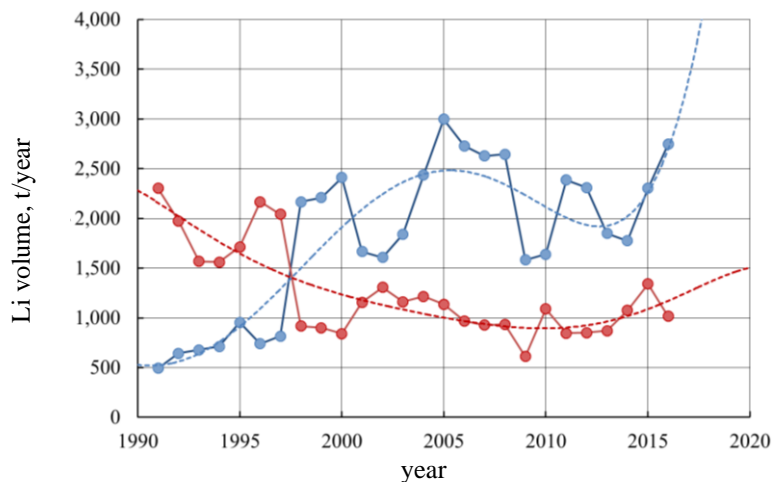
Временные изменения экспорта и импорта лития и его соединений в США имеют следующий вид: с одной стороны, отличаются достаточно сильной волатильностью, а с другой – четко выраженной тенденцией. Волатильность этих показателей обусловлена изменениями на мировом рынке лития, в частности, мировыми кризисными явлениями 2008–2009 гг. и появлением растущего спроса на этот минерал. В течение последних 20 лет импорт и экспорт имеют разнонаправленную тенденцию («эффект ножниц») – импорт превышает экспорт.



**Рис. 4** – Объемы экспорта (красная линия) и импорта (синяя линия) лития и его соединений в США: точки – данные U.S. Geological Survey [9]; пунктирные линии – расчетный тренд  
**Fig. 4** – The lithium and its compounds volumes of export (red line) and import (blue line) in the US: points – data of U.S. Geological Survey [9]; dotted lines – the calculated trend

Этот эффект указывает на то, что промышленность США стала в первую очередь ориентироваться на импортное сырье. В работе [1] отмечено, что основные американские компании, производящие литий и его соединения, ориентируются в большей степени на латиноамериканское литиевое сырье. Для того чтобы проанализировать уровень добычи и внутреннего потребления лития в США, была

предпринята попытка рассчитать зависимости на основе данных по экспорту и импорту (см. рис. 4) и показателю доли чистого импорта в объеме видимого потребления [9]. По расчетам авторов этой работы, средний показатель доли чистого импорта в объеме видимого потребления лития промышленностью США в последние годы колеблется в пределах 84 %.



**Рис. 5** – Объем добычи лития в США (красная линия) и объем внутреннего потребления лития всеми отраслями промышленности США (синяя линия): пунктирные линии – расчетный тренд  
**Fig. 5** – The volume of lithium production in the US (red line) and the volume of domestic consumption of lithium by all US industries (blue line): dotted lines – the calculated trend

Представленные на рис. 5 расчетные данные не претендуют на абсолютную достоверность, но при этом позволяют оценить тенденции производства и потребления лития промышленностью США. Так, до 2014 г. объем добычи лития в США имел стабильную тенденцию к снижению, и только с 2014 г. начинает проявляться некоторая не совсем стабильная тенденция к росту, которая с большой вероятностью не превысит 1 500 тонн в год в ближайшем будущем. При этом видно, что кривая внутреннего потребления лития в США (см. рис. 5) очень похожа на кривую импорта лития и его соединений (см. рис. 4). Этот фактор указывает на то, что в США сложилась тенденция использования в первую очередь импортного литиевого сырья для обеспечения своих потребностей.

Тенденция изменения объема внутреннего потребления, судя по данным (см. рис. 5), указывает на возможность резкого скачка этих объемов в самое ближайшее время. По нашей оценке, уже в 2018 г. этот показатель превысит отметку в 4 000 тонн в год. Кроме того, можно также предположить, что США, несмотря на определенные запасы литиевых минералов и наличие нескольких озер с весьма богатой по литию рапой, ориентируются в первую очередь на импорт сырья. Этот факт можно по аналогии связать с подходом США к нефтедобыче – стараться не разрабатывать свои месторождения нефти. Это подтверждают данные Геологической службы США по идентифицированным литиевым ресурсам, которые недавно были пересмотрены до 6,7 млн. тонн, что существенно отличается от официально утвержденных запасов (всего 38 000 тонн) [9].

Литиевый рынок США является зеркальным отражением мировых рынков с точки зрения конечного потребления, которое оценивается следующим образом: батареи – 35 %; керамика и стекло – 32 %; смазочные материалы – 9 %; вещества для очистки воздуха и порошковые флюсы для непрерывного литья – по 5 %; производство полимеров – 4 %; первичное производство алюминия – 1 %; другие виды использования – 9 %. За последние годы потребление литиевых батарей значительно выросло, поскольку перезаряжаемые литиевые батареи широко применяются в портативных электронных устройствах и, все чаще, в электроинструментах, электромобилях и сетевых хранилищах информации. Следует отметить, что в США, как и по всему миру, для изготовления стекла и керамики литиевые минералы используются непосредственно в виде рудных концентратов.

#### 4. Результаты оценки дополнительных мировых запасов лития

Как уже отмечалось, в 2010–2012 гг. произошел резкий скачок в оценке размеров мировых резервов лития (см. рис. 2), который был обеспечен такими странами, как Чили, Аргентина и Китай и сопровождался ростом мировой добычи (см. рис. 3). В работах [1, 2] отмечалось, что резервы составляют всего 30 % от объемов лития, содержащегося в подземной рапе и попутных нефтяных водах. Таким образом, можно грубо оценить разведанные, но не утвержденные запасы лития в этих источниках – примерно 50 млн. тонн.

Подземные рассолы и попутные нефтяные воды образуются в результате растворения солевых минеральных отложений соленосных осадочных бассейнов в земной коре водами, поступающими в недра Земли с поверхности. Соответственно, соленосные осадочные бассейны – это бассейны с осадочной породой, содержащие соляные и в большинстве своем галогенные толщи, часто одну или более галогенных формаций. Среди крупных осадочных бассейнов мира около половины (более 110) содержат соляные (галогенные) толщи, то есть являются соленосными (рис. 6). Соленосные бассейны широко распространены по всей планете: в пределах всех континентов, морей, океанических окраин, кроме абиссальных пространств самих океанов. На суше и в акваториях соли, с которыми связаны чрезвычайно высокие концентрации и запасы бора, лития, иногда калия, рубидия и др., вскрыты на всех ныне доступных бурению глубинах земных недр. Эти отложения образовывались в историческом промежутке от 600 млн лет до н.э. вплоть до настоящего времени.

Повышенное содержание лития наблюдается, прежде всего, в хлоридно-натриевых, хлоридно-сульфатно-калиевых образованиях. Объемы этих образований определены достаточно точно [17]. Для оценки глобальных литиевых ресурсов в данной статье используется информация о запасах хлоридно-калиевых солей, так как литий склонен накапливаться именно в таких отложениях. По данным [17], объем отложений хлоридно-калиевых солей составляет примерно 77 млн км<sup>3</sup>. С учётом плотности этих солей, равной около 2,1 г/см<sup>3</sup>, получаем массу этих залежей – приблизительно  $1,6 \cdot 10^{17}$  тонн. Поскольку содержание лития в таких породах обычно ниже суммарного содержания калия и натрия примерно в 5 500÷11 000 раз, а породы представляют собой в основном хлориды, можно оценить запасы лития в этих породах – около  $7,4 \cdot 10^{12}$  тонн. Отсюда можно сделать вывод, что бедные по литию подземные воды являются неисчерпаемым в локальном периоде и возобновляемым источником лития.



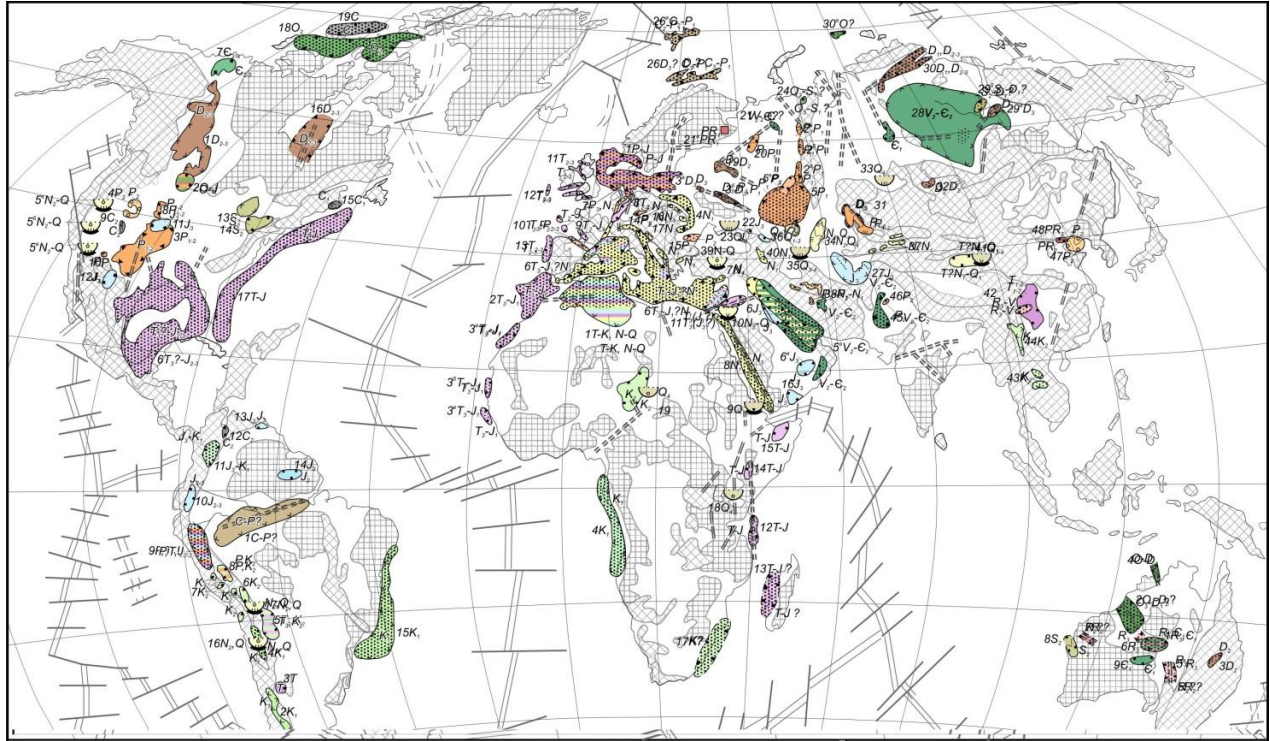


Рис. 6 – Соленосные бассейны мира [16–18] (бассейны сульфатно-кальциевого типа, не содержащие солей других типов, а также имеющие ограниченное распространение, на карте не показаны):

Возрастные группы соленосных бассейнов		Вещественно-геохимические типы солей*					Стратиграфический возраст				
		хлоридно-натриевый	хлоридно-калиевый	сульфатно-калийный	сульфатно-натриевый	карбонатно-натриевый (содовый)	Q	J <sub>1</sub>	C <sub>1,2</sub>	C <sub>2,3</sub>	E <sub>2,3</sub>
<b>Палеобассейны</b>											
Современные бассейны (озерные, лагунные)	Рапа и современные осадки	—	—	—			—	—	—	—	
	Рапа, осадки и погребенные залежи	—					—	—	—	—	

\* Для палеобассейнов - границы распространения (а - локальные), пунктир - предполагаемые; для современных бассейнов - внемасштабные знаки. Смешанные типы показаны сочетанием значков. Прочерк в легенде - типы на карте отсутствуют. Цвет заливки поля отвечает стратиграфическому возрасту, при наличии в разрезе солей двух-трех возрастов дана либо полосатая закрашка, либо показаны только доминирующие.

Площади проявления солончужной тектоники  
 Складчатые области  
 Рифты внутриконтинентальные  
 Рифты внутриокеанические  
 18 D, Номер соленосного осадочного бассейна и возраст солей  
 Выступы фундамента в пределах древних платформ  
 неогединамические  
 докейнозойские погребенные

Fig. 6 – Saline basins of the world [16–18] (pools of sulphate-calcium type which do not contain salts of other types, and have limited distribution are not shown on the map):

Age groups of saline basins		Chemical and geochemical types of salts *					Stratigraphic age				
		Sodium chloride	Potassium Chloride	Potassium sulphate	Sodium sulfate	Sodium carbonate	Q	J <sub>1</sub>	C <sub>1,2</sub>	C <sub>2,3</sub>	E <sub>2,3</sub>
<b>Paleobasins</b>											
Modern basins (lake lagoons)	Рапа and modern sedimentary rocks	—	—	—			—	—	—	—	
	Рапа, sediments and funeral deposits	—					—	—	—	—	

\* For paleo basins - the boundaries of propagation (a - local), dotted lines - prepolar; for modern basins - use of scale symbols. Modern types are shown by a combination of icons. A dash in the legend - there are no types on the map. The color of the field filling corresponds to the stratigraphic age, if there are two or three ages in the profile, either striped shading is shown or only dominant ones are shown

Squares manifestations of salt dome tectonics  
 Folded areas  
 Rifts inland  
 Rifts inside the ocean  
 18 D, Number of salt sedimentary basin and age of salts  
 The projections of the foundation within the ancient platforms  
 non-geodynamic  
 before Cenozoic, funerary



## 5. Перспективы увеличения объемов добычи лития в мире

На сегодняшний день мировой объем добычи лития составляет 40 тыс. тонн в год. По нашим расчетам, объемы его добычи к 2020 г. могут достигнуть 52÷65 тыс. тонн. Таким образом, прирост может составить 12÷25 тыс. тонн лития в год. Приняв за точку отсчета цену на карбонат лития в размере 13 400 \$ за тонну, получим возможный прирост объемов рынка лития – 850÷1 750 млн \$ в год. С учетом того, что цены на карбонат лития в Китае выросли более чем в 2 раза по сравнению с базовой ценой и продолжают расти, прирост объемов рынка лития может также вырасти в 2 раза и составить от 1,5 млрд \$ в год до 3,5 млрд \$ в год.

Это может произойти за счёт экстенсивного пути, связанного с увеличением мощностей действующих производств и ростом добычи лития из существующих источников. Однако этот путь ограничивается существующими и разведанными запасами лития и будет приводить к постепенному снижению темпов роста добычи ввиду исчерпания ресурсов, что уже фактически произошло с добычей литиевых минералов, доля которых в существующих резервах за последние 20 лет имеет тенденцию к снижению (см. рис. 2).

Прогнозируемый прирост добычи лития может быть обеспечен тремя интенсивными путями:

- 1) повышение эффективности добычи лития из существующих сырьевых источников;
- 2) привлечение в качестве ресурсов бедных литиевых источников, таких как подземные рассолы, попутные нефтяные воды и воды озер с низким содержанием лития;
- 3) переработка вышедших из строя литиевых батарей.

При повышении эффективности добычи лития следует обратить внимание на следующий факт. Существующие схемы переработки рассолов озер с высоким содержанием лития основываются на галургическом переделе, который позволяет извлекать в среднем не более 75 % лития, содержащегося в исходном растворе. Таким образом, 25 % лития остается в хвостах (отходы процессов обогащения полезных ископаемых). Учитывая то, что средний объем добычи лития составляет примерно 40 тыс. тонн в год, объем потерь – около 10 000 тонн в год. Опираясь на принятую авторами данной статьи базовую цену карбоната лития, получим объем недополученного карбоната лития в размере примерно 700÷1 500 млн. \$ в год, в зависимости от возможной цены.

Одним из высокотехнологичных методов является технология извлечения лития с помощью неорганических композиционных высокоселективных к

литу сорбентов, которые были разработаны в статьях [1, 19]. Эти сорбенты можно применять, как для доизвлечения лития на существующих производствах, так и для создания новых производств по его извлечению из бедных по литию природных растворов, таких как подземные воды и попутные воды нефтяных месторождений.

Попутной водой называют воду любого происхождения, добываемую из продуктивного пласта с нефтью или газом [20, 21]. Проблема исключения негативного действия промежуточных водных слоев на процесс отстоя добытой нефти касается всех нефтяных регионов мира. Так, средняя обводненность добываемой нефти, по нефтедобывающей отрасли России, составляет более 75 % [22]. Объем нефтедобычи в России является одним из крупнейших в мире, потому это значение можно с определенной вероятностью распространить на всю добываемую в мире нефть. По данным на 2016 г. объем мировой добычи нефти составлял 4382,4 млн тонн в год, соответственно, объем попутных нефтяных вод – примерно 3 300 млн. м<sup>3</sup> в год. Поскольку обычно содержание лития в этих водах колеблется в пределах 5÷50 г/м<sup>3</sup>, для расчета содержание лития примем равным 10 г/м<sup>3</sup> (ниже добыча нерентабельна), тогда потенциальный объем лития, который может быть добыт из попутных нефтяных вод, составит примерно 33 000 тонн в год. Таким образом, может быть получено около 176 тыс. тонн карбоната лития, что эквивалентно объему рынка карбоната лития от 2,4 млрд \$/год до 5,3 млрд \$/год в зависимости от цены.

Проблему утилизации литиевых батарей необходимо рассматривать как перспективную задачу, которая осложнена организационной проблемой сбора отработанных батарей. Исторически рециркуляция лития была незначительной, но неуклонно возрастала из-за роста потребления литиевых батарей. Например, компания Albemarle Co из США перерабатывает литиевые металлы и литий-ионные батареи с 1992 г. на своем объекте в Британской Колумбии, Канада. В 2009 г. министерство энергетики США выделило этой компании грант в размере 9,5 млн. \$ США на строительство (завершилось в 2015 г.) первой установки по переработке литий-ионных аккумуляторных батарей [1, 9].

Можно оценить потенциальный объем рынка вторичного лития из отработанных батарей. В 2017 г. число электромобилей в мире подошло к отметке 2 млн, по оценкам Международного энергетического агентства, если страны будут следовать Парижскому климатическому соглашению, к 2030 г. в мире будет функционировать 140 млн электромобилей. Это может привести к появлению 11 млн тонн отработанных литий-ионных батарей, нуждающихся в утилизации в период между сегодняшним днем и 2030 г. [23]. Однако в ЕС перерабатывается всего 5 % литий-ионных батарей, что имеет



экологические издержки [24]: выделение токсичных газов; разрушение аккумуляторов может привести к загрязнению воды и проявлению других экологических последствий [25, 26].

Как отмечалось ранее, 35 % объема добываемого лития идет на изготовление литиевых батарей. Поскольку объем добычи лития составляет примерно 40 тыс. тонн в год, количество лития, пошедшее на изготовление батарей, составляет примерно 14 тыс. тонн в год. Можно предположить, что весь этот объем идет на обновление имеющегося парка батарей, так как малые батареи служат от одного до двух месяцев, а срок службы больших батарей не превышает 3 лет. Поэтому полученная оценка дает верхнюю границу объема рынка лития для батарей – от 1,0 млрд \$ в год до 2,2 млрд \$ в год в зависимости от цены на карбонат лития.

## 6. Заключение

Проведенный анализ мировых литиевых ресурсов и тенденций изменения объемов добычи и потребления лития показал, что используемые в настоящее время ресурсы и технологии добычи имеют существенные ограничения – богатые литиевые ресурсы могут истощиться достаточно быстро. Проведенные расчеты показали, что литиевые руды в мире закончатся примерно через 25 лет, а литиевые запасы разведанных ресурсов, связанные с соляными озерами, – примерно через 50 лет. Это в свою очередь может привести к резкому росту цен на литий и, следовательно, к снижению рентабельности его применения в литиевых батареях. На основе анализа колебаний рынка лития статистическими методами была оценена минимально и максимально возможная цена на карбонат лития к 2020 г. – 30 000 US\$ и 50 000 US\$ за тонну соответственно.

В связи с этим перспективными становятся запасы лития, сосредоточенные в подземных водах, в том числе попутных нефтяных.

Наиболее типичный пример существующей структуры добычи, потребления и экспорта и импорта литиевого сырья дают США. На базе данных по объемам экспорта и импорта лития и его соединений в США удалось с определенной долей вероятности восстановить информацию по добыче и внутреннему потреблению лития всеми отраслями промышленности США. Эти данные позволили также предположить, что США ориентируются в первую очередь на импорт литиевого сырья. В будущем эта тенденция может измениться.

Проведенный анализ литературных данных по объемам отложений хлоридно-калиевых солей позволил оценить массу этих залежей – приблизительно  $1,6 \cdot 10^{17}$  тонн и, соответственно, запасы лития в

этих породах – около  $7,4 \cdot 10^{12}$  тонн. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что бедные по литию подземные воды одновременно являются неисчерпаемым, а в локальном периоде и возобновляемым источником лития.

Проведенные исследования показали, что для обеспечения прогнозируемого авторами данной статьи прироста добычи лития необходимо проводить интенсивные исследования по трем основным направлениям (см. главу 5).

## Список литературы

[1] Kudryavtsev, P.G. Lithium In Nature, Application, Methods of Extraction (Review) [Text] / P.G. Kudryavtsev // Scientific Israel-Technological Advantages. – 2016. – Vol. 18. – No 3. – P. 63–83. ISSN: 1565-1532

[2] Кудрявцев, П.Г. Литий: Мировые запасы и перспективы применения [Текст] / П.Г. Кудрявцев // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2016. – № 13–14. – С. 72–88. DOI: <http://dx.doi.org/10.15518/isjaee.2016.13-14.072-088>.

[3] Кудрявцев, П.Г. Сравнение эффективности способов извлечения лития и его соединений из природного сырья [Текст] / П.Г. Кудрявцев, Н.П. Кудрявцев // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 28–30. – С. 82–105.

[4] WEALTHDAILY. Special Report: Lithium: The Oil of the 21st Century [E-resource]. – Available on: <https://www.wealthdaily.com/report/lithium-the-oil-of-the-21st-century/1449> 2018 – (Дата обращения: 14.03.18.).

[5] Lithium: A Bubble Waiting to Burst? [E-resource]. – Available on: <https://themarketmogul.com/lithium-next-oil-next-bubble/> – (Дата обращения: 01.03.17.).

[6] Литий — это новая нефть? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.insider.pro/investment/2017-03-02/litij-etonovaya-neft/> – (Дата обращения: 02.03.17.).

[7] The Global Scramble for Lithium – MarketWatch, Published: Oct 5, 2017 8:30 a.m. ET [E-resource]. – Available on: <http://www.marketwatch.com/story/the-global-scramble-for-lithium-2017-10-05/print> – (05.10.17.).

[8] Power company kills nuclear plant, plans \$6 billion in solar, battery investment [E-resource]. – Available on: <http://nnw.fm/gp4RD> 8/31/2017. – (31.08.17.).

[9] Mineral Commodity Summaries U.S. Geological Survey [E-resource]. – Available on: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/> – (Дата обращения: 09.02.18.).

[10] Lithium Market Update: Q1 2018 in Review [E-resource]. – Available on: <https://investingnews.com/daily/resource-investing/energy->



investing/lithium-investing/lithium-market-update/ – (Дата обращения: 17.02.18.).

[11] Galaxy Resources Limited, Investor Presentation [E-resource]. – Available on: <http://www.asx.com.au/asxpdf/20170504/pdf/43j0x935853c09.pdf> – (Дата обращения: 01.05.17.).

[12] Trends in lithium project transactions [E-resource]. – Available on: <https://snowdengroup.com/news/trends-lithium-project-transactions/> – (Дата обращения: 16.08.16.).

[13] Search Import Export Data of India [E-resource]. – Available on: <https://www.zauba.com/import-lithium-carbonate-hs-code.html> – (Дата обращения: 18.02.18.).

[14] Lithium Miner News For The Month Of May 2017 [E-resource]. – Available on: <https://seekingalpha.com/article/4077382-lithium-miner-news-month-may-2017> – (Дата обращения: 15.05.17.).

[15] Latest Minor Metals News [E-resource]. – Available on: <https://price.metal.com/prices/other-minor-metals#> – (Дата обращения: 31.10.17.).

[16] Беленицкая, Г.А. Тектонические аспекты пространственного и временного распределения соленосных бассейнов мира / Г.А. Беленицкая // Электронное научное издание Альманах «Пространство и время». Специальный выпуск СИСТЕМА ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ. – 2013. – Т. 4. – Вып. 1. – С. 1–31.

[17] Беленицкая, Г.А. Соленосные осадочные бассейны. Литолого-фациальный, геодинамический и минерагенический анализ [Текст] / Г.А. Беленицкая. – Осадочные бассейны России. Вып. 4. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000. – 72 с.

[18] Wang, S. Distribution of Cambrian Salt-Bearing Basins in China and Its Significance for Halite and Potash Finding / S. Wang [et al.] // *Journal of Earth Science*. – Vol. 24. – No. 2. – P. 212–233. DOI: 10.1007/s12583-013-0319-0.

[19] Kudryavtsev, P. Alkoxides of chemical elements - Promising class of chemical compounds which are raw materials for HI-TECH industries / P. Kudryavtsev // *Scientific Israel – Technological Advantages*. – 2014. – Vol. 16. – No. 2. – P.147–170.

[20] Зорькин, Л.М. Воды нефтяных и газовых месторождений СССР: Справочник / Л.М. Зорькин. М.: Недра. 1989. – 382 с. ISBN 5-247-00425-6

[21] Water Issues Dominate Oil and Gas Production, Oil & Natural Gas Program Newsletter, Fall 2013 [E-resource]. – Available on: <https://www.netl.doe.gov/file%20library/research/oil-gas/epnews-2013-fall.pdf> – (Дата обращения: 20.01.18.).

[22] Зарипов, А.Г. Комплексная подготовка продукции нефтегазодобывающих скважин: Т. 1 / А.Г.

Зарипов. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 1996.

[23] The rise of electric cars could leave us with a big battery waste problem, *The Guardian* [E-resource]. – Available on:

<https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/aug/10/electric-cars-big-battery-waste-problem-lithium-recycling> – (Дата обращения: 10.08.17.).

[24] Lithium [E-resource]. – Available on: [http://www.foeeurope.org/sites/default/files/publications/13\\_factsheet-lithium-gb.pdf](http://www.foeeurope.org/sites/default/files/publications/13_factsheet-lithium-gb.pdf) – (Дата обращения: 16.02.18.).

[25] European Battery Recycling Association, EBRA welcomes the publication of the Commission Regulation on the calculation of recycling efficiencies for the recycling of waste batteries and accumulators, press release, [E-resource]. – Available on: [http://www.ebra-recycling.org/sites/default/files/20120629\\_PR%20EBRA-Welcoming%20REG%20on%20RE.pdf](http://www.ebra-recycling.org/sites/default/files/20120629_PR%20EBRA-Welcoming%20REG%20on%20RE.pdf) – (22.06.12.).

[26] Ekermo V., Recycling opportunities for Li-ion batteries from hybrid electric vehicles: Master of Science Thesis in Chemical Engineering, Department of Chemical and Biological Engineering Industrial Materials Recycling Göteborg, Sweden, 2009. See the table on page 4 for the comparison of voltage and charge densities for common battery chemistries [E-resource]. – Available on: [http://www.chalmers.se/chem/EN/divisions/industrial-recycling/finished-projects/recycling-opportunities/downloadFile/attachedFile\\_f0/Recycling\\_opportunities\\_for\\_Li-ion.pdf?nocache=1294145371.31](http://www.chalmers.se/chem/EN/divisions/industrial-recycling/finished-projects/recycling-opportunities/downloadFile/attachedFile_f0/Recycling_opportunities_for_Li-ion.pdf?nocache=1294145371.31) – (16.12.2017).

## References

[1] Kudryavtsev P.G. Lithium in Nature, Application, Methods of Extraction (Review). *Scientific Israel-Technological Advantages*, 2016;18(3)63–83; ISSN: 1565-1532.

[2] Kudryavtsev P.G. Lithium: World reserves and prospects of application (Litii: Mirovye zapasy I perspektivy primeneniya). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2016;13–14:72–88; DOI: <http://dx.doi.org/10.15518/isjaee.2016.13-14.072-088> (in Russ.).

[3] Кудрявцев П.Г., Кудрявцев Н.П. Сравнение эффективности способов извлечения лития и его соединений из природного сырья *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2017;28–30:82–105 (in Russ.).

[4] WEALTHDAILY. Special Report: Lithium: The Oil of the 21st Century [E-resource]. Available on: <https://www.wealthdaily.com/report/lithium-the-oil-of-the-21st-century/1449> 2018 (14.03.18.).



- [5] Lithium: A Bubble Waiting to Burst? [E-resource]. Available on: <https://themarketmogul.com/lithium-next-oil-next-bubble/> (01.03.17.).
- [6] Is Lithium a New Oil? (Litii – novaya neft'?) [E-resource]. Available on: <https://ru.insider.pro/investment/2017-03-02/litij-eto-novaya-neft/> 2017-03-02 (02.03.17.) (in Russ.).
- [7] The Global Scramble for Lithium – MarketWatch, Published: Oct 5, 2017 8:30 a.m. ET, [E-resource]. Available on: <http://www.marketwatch.com/story/the-global-scramble-for-lithium-2017-10-05/print> (05.10.17.).
- [8] Power company kills nuclear plant, plans \$6 billion in solar, battery investment [E-resource]. Available on: <http://nnw.fm/gp4RD> (31.08.17.).
- [9] Mineral Commodity Summaries U.S. Geological Survey [E-resource]. Available on: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/> (09.02.18.).
- [10] Lithium Market Update: Q1 2018 in Review [E-resource]. Available on: <https://investingnews.com/daily/resource-investing/energy-investing/lithium-investing/lithium-market-update/> (17.02.18.).
- [11] Galaxy Resources Limited, Investor Presentation [E-resource]. Available on: <http://www.asx.com.au/asxpdf/20170504/pdf/43j0x935853c09.pdf> (01.05.17.).
- [12] Trends in lithium project transactions [E-resource]. Available on: <https://snowdengroup.com/news/trends-lithium-project-transactions/> (16.08.16.).
- [13] Search Import Export Data of India [E-resource]. Available on: <https://www.zauba.com/import-lithium-carbonate-hs-code.html> (18.02.18.).
- [14] Lithium Miner News for the Month of May 2017 [E-resource]. Available on: <https://seekingalpha.com/article/4077382-lithium-miner-news-month-may-2017> (15.05.17.).
- [15] Latest Minor Metals News [E-resource]. Available on: <https://price.metal.com/prices/other-minor-metals#> (31.10.17.).
- [16] Belenitskaya G.A. Tectonic aspects of spatial and temporal distribution of saline basins of the world (Tectonicheskie aspekty prostranstvennogo i vremennogo raspredeleniya solenosnyh basseinov mira). Electronic Scientific Edition Almanah "Prostranstvo i vremya". Special issue "Sistema Planeta Zemlya", 2013;4(1):1–31 (in Russ.).
- [17] Belenitskaya G.A. Saline sedimentary basins. Lithologic and facies, geodynamic and mineralogical analysis. Sedimentary basins of Russia (Solenosnye osadochnye basseiny. Litologo-fatsialnyi, geodinamicheskii i mineragenicheskii analiz. Osadochnye basseiny Rossii). Iss. 4. SPb: Vsegei Publ., 2000 (in Russ.).
- [18] Wang S., Zheng M., Liu X., Niu X., Chen W., Su K. Distribution of Cambrian Salt-Bearing Basins in China and Its Significance for Halite and Potash Finding. *Journal of Earth Science*, 24(2):212–233. DOI: 10.1007/s12583-013-0319-0.
- [19] Kudryavtsev P. Alkoxides of chemical elements – Promising class of chemical compounds which are raw materials for HI-TECH industries. *Scientific Israel – Technological Advantages*, 2014;16(2):147–170.
- [20] Zorkin L.M. Waters of oil and gas deposits of the USSR, Handbook (Vody neftnykh i gazovykh mestorozhdenii SSSR). Moscow: Nedra Publ., 1989, ISBN 5-247-00425-6
- [21] Water Issues Dominate Oil and Gas Production, Oil & Natural Gas Program Newsletter, Fall 2013, [E-resource]. Available on: <https://www.netl.doe.gov/file%20library/research/oil-gas/epnews-2013-fall.pdf> (20.01.18.).
- [22] Zaripov A.G. Complex preparation of oil and gas production wells (Kompleksnaya podgotovka produktivnykh neftegazodobyvaushchikh skvazhin), vol 1. Издательство Московского Государственного Горного Университета, Moscow: izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 1996
- [23] The rise of electric cars could leave us with a big battery waste problem, The Guardian [E-resource]. Available on: <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/aug/10/electric-cars-big-battery-waste-problem-lithium-recycling> (10.08.17.).
- [24] Lithium [E-resource]. Available on: [http://www.foeurope.org/sites/default/files/publications/13\\_factsheet-lithium-gb.pdf](http://www.foeurope.org/sites/default/files/publications/13_factsheet-lithium-gb.pdf) (16.02.18.).
- [25] European Battery Recycling Association, EBRA welcomes the publication of the Commission Regulation on the calculation of recycling efficiencies for the recycling of waste batteries and accumulators, press release [E-resource]. Available on: [http://www.ebra-recycling.org/sites/default/files/20120629\\_PR%20EBRA-Welcoming%20REG%20on%20RE.pdf](http://www.ebra-recycling.org/sites/default/files/20120629_PR%20EBRA-Welcoming%20REG%20on%20RE.pdf) (22.06.12.).
- [26] Ekermo V., Recycling opportunities for Li-ion batteries from hybrid electric vehicles: Master of Science Thesis in Chemical Engineering, Department of Chemical and Biological Engineering Industrial Materials Recycling Göteborg, Sweden, 2009. See the table on page 4 for the comparison of voltage and charge densities for common battery chemistries [E-resource]. Available on: [http://www.chalmers.se/chem/EN/divisions/industrial-recycling/finished-projects/recycling-opportunities/downloadFile/attachedFile\\_f0/Recycling\\_opportunities\\_for\\_Li-ion.pdf?nocache=1294145371.31](http://www.chalmers.se/chem/EN/divisions/industrial-recycling/finished-projects/recycling-opportunities/downloadFile/attachedFile_f0/Recycling_opportunities_for_Li-ion.pdf?nocache=1294145371.31) (16.12.17.).

Транслитерация по BSI

