

Электрохимическая энергетика. 2023. Т. 23, № 3. С. 111–120

Electrochemical Energetics, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 111–120

<https://energetica.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-3-111-120>, EDN: LQUIWI

Краткий обзор

УДК 544.6:621.355

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ В МИРЕ И РОССИИ

Т. Л. Кулова, А. М. Скундин[✉]

*Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН
Россия, 119071, г. Москва, Ленинский просп., д. 31, корп. 4*

Кулова Татьяна Львовна, доктор химических наук, заведующий лабораторией, tkulova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5838-804X>

Скундин Александр Мордухаевич, доктор химических наук, главный научный сотрудник, askundin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7627-5703>

Аннотация. Проведен краткий анализ современного состояния развития литий-ионных аккумуляторов в мире и в России. Сделан вывод, что масштаб производства литий-ионных аккумуляторов в России составляет сотые доли процента от мирового производства. Прогнозируется, что к 2030 году доля российских литий-ионных аккумуляторов может возрасти до 0.2% от мирового уровня.

Ключевые слова: литий-ионные аккумуляторы, промышленное производство, сырьё и материалы

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по теме «Физикохимия и технология материалов электрохимической и биоэнергетики (FFZS-2022-0016)», регистрационный номер: 1021062110793-3-1.4.5;1.4.3.

Для цитирования: Кулова Т. Л., Скундин А. М. Проблемы развития литий-ионных аккумуляторов в мире и России // Электрохимическая энергетика. 2023. Т. 23, № 3. С. 111–120. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-3-111-120>, EDN: LQUIWI

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Brief review

Problems of development of lithium-ion batteries all over the world and in Russia

T. L. Kulova, A. M. Skundin[✉]

*A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS
31 Leninsky prosp., 119071 Moscow, Russia*

Tatiana L. Kulova, tkulova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5838-804X>

Alexander M. Skundin, askundin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7627-5703>

Abstract. A brief analysis of the current situation in the development of lithium-ion batteries in Russia and all over the world has been carried out. The conclusion is made that Russia produces only a basis point of lithium-ion batteries in the world. It is predicted that Russian production of lithium-ion batteries may increase up to 0.2% in the world by 2030.

Keywords: lithium-ion batteries, industrial production, raw materials

Acknowledgments. The work is supported by Ministry of science and higher education of RF on the topic “Physical chemistry and technology of materials for electrochemical and bioenergy (FFZS-2022-0016)”, registration number: 1021062110793-3-1.4.5;1.4.3.

For citation: Kulova T. L., Skundin A. M. Problems of development of lithium-ion batteries all over the world and in Russia. *Electrochemical Energetics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 111–120 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-3-111-120>, EDN: LQUIWI

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

ВВЕДЕНИЕ

Литий-ионные аккумуляторы в XXI веке стали основным видом электрических аккумуляторов. Их преимущества перед накопителями энергии других электрохимических систем неоспоримо, что подтверждается присуждением в 2019 г. Нобелевской премии за их создание. Несмотря на это, 10–15 лет назад в мировом электрохимическом сообществе началось обсуждение перспектив развития литий-ионных аккумуляторов и было сформулировано почти единодушное мнение, что вскоре на смену литий-ионным аккумуляторам придут устройства, основанные на других электрохимических системах, и наиболее вероятными представителями так называемой «пост-литиевой эпохи» называют натрий-ионные, литий-серные и литий-кислородные аккумуляторы. Именно в этих направлениях и развиваются сейчас научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. В то же время собственно литий-ионные аккумуляторы продолжают совершенствоваться, в основном с целью улучшения таких показателей, как удельная мощность (способность к форсированному заряду), работоспособность в широком температурном диапазоне, циклический ресурс и, конечно, удельная энергия, безопасность и себестоимость. Эти усовершенствования проходят на фоне непрерывно растущего объёма производства литий-ионных аккумуляторов (рис. 1).

Как видно, прогнозируется практически экспоненциальный рост объёма производства. Современный мировой объём производства превышает 800 ГВт·ч. Если считать среднюю энергоёмкость стандартного аккумулятора типоразмера 18650 по порядку величины равной 10 Вт·ч, то это соответствует годовому производству 80 миллиардов штук.

В последнее время опубликовано несколько обзорных работ, посвященных развитию литий-ионных аккумуляторов (см., например, [2–4]).

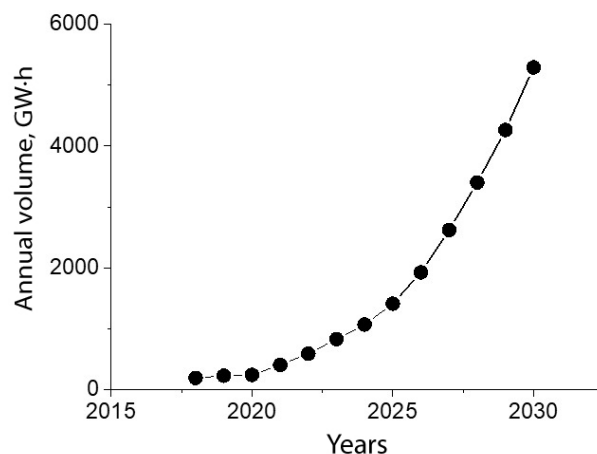


Рис. 1. Фактический (до 2022 г.) и прогнозируемый рост объёма мирового производства литий-ионных аккумуляторов (сост. по [1])

Fig. 1. The actual (up to 2022) and the projected growth in the global production of lithium-ion batteries (according to [1])

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Пути совершенствования литий-ионных аккумуляторов, с одной стороны, традиционные – использование новых активных электродных материалов, использование наноматериалов (включая 1D и 2D материалы), допирование активных материалов различными ионами, контролируемая морфология индивидуальных частиц активного материала, использование структур «ядро-оболочка» и структур с градиентным составом, нанесение различных покрытий на зёрна активного материала, различные усовершенствования жидких электролитов, использование ионных жидкостей и т. д., а с другой стороны – несколько неожиданные, в частности возврат к использованию металлического лития в качестве материала отрицательного электрода и связанный с этим интерес к полностью твердотельным литий-ионным аккумуляторам.

Основные материалы положительных электродов, сочетающие достаточно высокую удельную ёмкость (более 200 мА·ч/г) и стабильность циклирования, относятся к категории многокомпонентных слоистых

оксидов общей формулы $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{M}_{1-x-y}\text{O}_2$ ($\text{M} = \text{Mn}, \text{Al}$). (Напомним, что в первых образцах литий-ионных аккумуляторов основой положительных электродов был простой литированный оксид LiCoO_2 , основным недостатком которого были необратимые структурные изменения при глубоком делитировании, что ограничивало разрядную ёмкость этого материала величинами около 150 мА·ч/г). На электродах с использованием многокомпонентных материалов достигнуты значения ресурса более 1000 циклов.

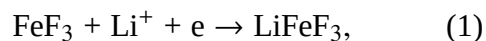
Примером благотворного влияния покрытий частиц активного вещества могут служить работы [5, 6]. В первой из них показано, что при циклировании электродов из чистого LiCoO_2 в режиме C/10 ёмкость за 200 циклов упала с 230 до 75 мА·ч/г (деградация на 67%). В опытах с таким же материалом, на поверхность которого нанесено 2% наночастиц смешанного оксида Li, Al и F, соответствующее изменение ёмкости составило от 220 до 170 мАг (деградация на 23%). В [6] показано, что нанесение наночастиц $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_2$ на LiCoO_2 позволило увеличить ёмкость в режиме 7C с 80 до 150 мА·ч/г. Аналогичные примеры с нанесением наночастиц на многокомпонентные оксиды можно найти в [7, 8].

Роль допирования активных материалов положительного электрода можно проиллюстрировать результатами работы [9], где показано, что допирование слоистого оксида $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ ионами тантала приводит к резкому снижению деградации при циклировании. Электроды из недопированного материала показали разрядную ёмкость 200 и 125 мА·ч/г на первом и сотом циклах (снижение ёмкости на 37.5%), тогда как для допированного материала эти показатели составили 202 и 185 мА·ч/г (снижение ёмкости на 8.5%).

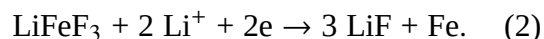
Очень показательным примером допирования материала положительного электрода является допирование пентаоксида ванадия литием [10]. Как известно, оксиды ванадия привлекают внимание исследователей

своей потенциально высокой удельной ёмкостью, однако им свойственны значительные структурные изменения при циклировании на сколь-нибудь приемлемую глубину. В [10] показано, что элегантно предварительное литирование нанолент (nanobelts) из $\alpha\text{-V}_2\text{O}_5$ до брутто-состава $\text{Li}_{0.0625}\text{V}_2\text{O}_5$ приводит к небольшому, но значимому изменению исходной структуры: увеличению межслоевого расстояния от 4.34 до 4.37 Å, что кардинально облегчает диффузию лития. В результате ёмкость электрода из необработанного $\alpha\text{-V}_2\text{O}_5$ снизилась за 100 циклов со 150 до 50 мА·ч/г, тогда как ёмкость предварительно литированного образца сохранялась на протяжении 1000 циклов (!) на уровне 192 мА·ч/г.

Относительно неожиданным подходом к повышению удельной ёмкости активного материала положительных электродов было предложение использовать для этой цели конверсионные электроды [11]. Примером таких электродов может быть фторид трёхвалентного железа. При катодной поляризации вначале происходит внедрение иона лития с образованием фазы LiFeF_3 :



а затем LiFeF_3 восстанавливается (конверсия) с разложением на LiF и элементарное железо:



Важно, что процессы (1) и (2) хорошо обратимы с суммарной теоретической удельной ёмкостью около 700 мА·ч/г. Ещё лучшими характеристиками обладает оксифторид $\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1}\text{OF}$, электроды из которого выдержали 1000 циклов при токе 0.5 А/г с ёмкостью 350 мА·ч/г.

Решение проблемы создания высокомогущных литий-ионных аккумуляторов может быть найдено с использованием ванадофосфатов лития в качестве активного вещества положительного электрода. Так, в [12] было показано, что электроды на основе $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ при заряде до потенциала

4.8 В (с электролитом на основе фторэтиленкарбоната) способны выдерживать циклирование в режиме 100С (полный заряд или разряд за 36 с) с удельной ёмкостью около 100 мА·ч/г. При циклировании в режиме 1С эти электроды демонстрировали ёмкость 90 мА·ч/г после 1000 циклов. В [13] показано, что электроды на основе литий ванадофосфата ($\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$) типа NASICON, способны обеспечить чрезвычайно быстрый транспорт лития, так электрохимическое извлечение/внедрение лития может происходить со сверхвысокими скоростями (до 320С). Способностью к форсированным зарядам и разрядам обладают и некоторые другие полианионные соединения. Хороший обзор таких материалов представлен в [14].

Определённый интерес представляет предложение использовать йод в качестве активного материала положительных электродов литий-ионных аккумуляторов. (Известно, что комплексные соединения йода давно используются в первичных литиевых элементах.) В [15] сообщается, что на основе композитов йода с пористым углеродом, допированным азотом и фосфором, удаётся приготовить электроды, демонстрирующие разрядную ёмкость около 400 мА·ч/г при плотности тока 200 мА/г и около 230 мА·ч/г при плотности тока 2 А/г. При плотности тока 500 мА/г такие электроды выдержали 2000 циклов. К сожалению, разрядный потенциал таких электродов составляет 2.8–2.9 В.

Также неожиданными были полученные в последнее время данные об органических материалах положительных электродов. Например, в работе [16] сообщается об электродах на основе поли-(4,4',4''-(1,3,5-триазин-2,4,6-триил)трифениламин)а, которые при плотностях тока 1 и 4 А/г выдержали более 5000 циклов с незначительной деградацией. Удельная ёмкость после 5000 циклов сохранялась на уровне 150 и 125 мА·ч/г соответственно. Авторы [17] сообщили об электродах на основе каликс(6)хинона, имеющих начальную ёмкость 380 мА·ч/г в режиме С/10

и 280 мА·ч/г в режиме 5С. На таких электродах была достигнута наработка 10000 циклов в режиме 5С. Наконец, в [18] рассказывается об испытаниях лабораторного макета литий-ионного аккумулятора со стандартным отрицательным электродом на основе графита и положительным электродом из пара-терфенил-2,2'',5,5''-тетраолата лития. Этот макет выдержал 20000 циклов при катодной плотности тока 2 А/г. Авторы [19] показали, что разрядная ёмкость катодного редокс-активного материала на основе продукта конденсации циклогексангексона с п-фенилендиамином составляет 285 мА·ч/г, что соответствует трехэлектронному окислительно-восстановительному процессу.

Усовершенствование отрицательных электродов проходило в последнее время в значительной мере по пути использования кремния. Как известно, интерес к кремнию основан на его рекордно высокой теоретической удельной ёмкости по внедрению лития. Основной недостаток электродов на основе кремния состоит в их деградации при циклировании за счёт значительных структурных изменений самого кремния, а также нестабильности пассивной плёнки (SEI, solid electrolyte interphase). Были разработаны различные наноструктуры (в том числе полые наночастицы, пористые наночастицы, нанотрубки, нановолокна, тонкие плёнки); композиционные материалы с графитом, углеродными нанотрубками, графеном, электронпроводящими полимерами, различными металлами; многослойные бинарные системы; частично окисленный кремний и композиты на основе SiO_2 . При разработке электродов на основе кремния отмечается решающая роль жидкого электролита и различных добавок, а также роль связующего (описано более 120 вариантов связующих, в том числе биополимеры). Электроды на основе кремния всё чаще используются в контакте с гель-полимерными и твёрдыми электролитами.

Примером достижения хорошей циклируемости электродов из чистого нанокремния может служить работа [20], в которой

описаны электроды со связующим на основе алгинатов (полисахаридов из бурых водорослей). При надлежащем выборе катиона для поперечной сшивки альгината удалось достичь удельной ёмкости 2000 мА·ч/г в режиме 20С. В режиме С/5 такие электроды выдержали 200 циклов с ёмкостью более 3500 мА·ч/г без заметной деградации.

В работе [21] рассказывается об электродах из кремниевых полых наносфер. На таких электродах (без связующего) при циклировании в режиме С/2 удельная ёмкость снизилась с 2500 до 1500 мА·ч/г за 700 циклов (деградация менее 0.06% за цикл).

Впечатляющие для кремниевых электродов результаты приведены в [22]. Здесь композит состоит из полианилинового каркаса, в котором закреплены наночастицы кремния, покрытие полианилином. На таких электродах после 5000 циклов с плотностью тока 6 А/г зарегистрирована ёмкость около 600 мА·ч/г. Для электродов на основе кремния это замечательный показатель циклируемости.

Уместно упомянуть также публикации [23] (где на пористом композите Si/C достигнута 400 циклов с ёмкостью 1400 мА·ч/г при токе 2.6 А/г, а при токе 11 А/г зарегистрирована ёмкость более 700 мА·ч/г), [24] (где на композите SiO₂/C с полиакриловой кислотой в качестве связующего получена ёмкость 700 мА·ч/г после 500 циклов с плотностью тока 0.5 А/г) и [25] (где на электроде из кремниевых нанотрубок получено 6000 циклов в режиме 12 С с сохранением удельной ёмкости 600 мА·ч/г).

В последнее время проявляется интерес к использованию наноструктур германия и его фосфидов как альтернатива кремнию в отрицательных электродах [26, 27]. Так, в [28] сообщалось об электродах на основе наночастиц германия, выдержавших 2500 циклов при нагрузках 1, 5 и 10С. Важно отметить, что электроды с наноструктурами германия сохраняют работоспособность при температурах до –55°C [29].

Как известно, решающим шагом при создании литий-ионных аккумуляторов был отказ от использования металлического лития в пользу интеркаляционных материалов, в частности графита. В последнее время, однако, наблюдается определённый ренессанс – возврат к металлическим литиевым электродам [30]. Основная проблема, связанная с металлическими литиевыми электродами, – это образование дендритов при катодном осаждении лития. В последнее время проводились интенсивные исследования механизма дендритообразования и образования SEI и поиски условий литиефильности, когда катодный процесс приводит к образованию плотного гладкого осадка. Эти условия многофакторные и учитывают влияние природы и концентрации электролита, наличие добавок в электролит, электростатический эффект катионов, обработку поверхности подложки, «искусственные SEI», использование твёрдых электролитов.

Определённой разновидностью аккумуляторов с металлическим литиевым электродом являются набирающие популярность «безанодные аккумуляторы» (anode-free batteries), при сборке которых вместо активного отрицательного электрода устанавливается только токоотвод, на который при первой катодной поляризации при заряде осаждается необходимое количество лития. В качестве положительных электродов здесь используются традиционные феррофосфат и слоистые оксиды лития. Особый интерес представляют полностью твердотельные «безанодные аккумуляторы», где достигнута начальная удельная ёмкость около 7 мА·ч/см² [31].

Усовершенствования жидких электролитов были в последнее время направлены на обеспечение функционирования так называемых «высоковольтных» катодов. Много усилий направлялось также на разработку твёрдых полимерных и неорганических электролитов. Были высказаны также и некоторые экзотические направления разработки электролитов. Приобретают популярность электролиты на основе сжиженных

газов [32] и твёрдые полимерные электролиты на основе литированных версий нафтона [33, 34].

По прогнозам к 2030 г. основными коммерческими катодными материалами станут слоистые оксиды переходных металлов (NMC, NCA), а также замещенные феррофосфаты лития (LMFP). В качестве основных коммерческих анодных материалов рассматриваются композиты кремния с углеродом, нанокремний и материалы на основе германия.

МИРОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ. ПРОБЛЕМЫ СЫРЬЯ

Неуклонно возрастающий объём производства литий-ионных аккумуляторов сопровождается и качественным изменением структуры их использования. Если в последнее десятилетие XX века литий-ионные аккумуляторы применялись почти исключительно для энергообеспечения портативной аппаратуры (прежде всего, мобильных телефонов, ноутбуков, фото- и видеокамер, беспроводного инструмента, медицинской аппаратуры, игрушек), характеризующейся энергозапасом 5–50 Вт·ч, то в последние два десятилетия основное производство литий-ионных аккумуляторов всё больше направлено на электротранспорт (электромобили и гибридные автомобили), системы с возобновляемыми источниками энергии, интеллектуальные электросети и т. п. установки с единичным энергозапасом до сотен кВт·ч.

В 2018 г. доля литий-ионных аккумуляторов (в единицах энергозапаса), направленных на электротранспорт, составляла 36%. В 2022 г. этот показатель поднялся до 57%, а к 2030 г. по прогнозу он достигнет 73%.

В структуре производства батарей литий-ионных аккумуляторов обычно выделяют несколько уровней: обеспечение сырьём, производство отдельных компонентов (электроды, электролит, сепаратор, корпус, токовыводы и т. п.), производство единичных аккумуляторов, производство батарей с системами обеспечения (BMS). Про-

изводство отдельных компонентов, единичных аккумуляторов и батарей сосредоточено в нескольких странах: Япония (Panasonic, Sony, GS Yuasa, Hitachi Vehicle Energy), Республика Корея (LG Chem, Samsung, Kokam, SK Innovation), Китай (BYD Company, ATL, Lishen) и США (Tesla, Johnson Controls, A123 Systems, EnerDel, Valence Technology). Совсем недавно лидерами производства были исключительно страны Юго-Восточной Азии, но с пуском в эксплуатацию гигазавода Tesla в Неваде почти треть объёма мирового производства отошла к США. Следует отметить, что географически довольно большие производственные мощности азиатских и американских компаний размещены в Европе. В то же время для многих гигантских компаний (например, Samsung, Panasonic, Sony) производство литий-ионных аккумуляторов не является основным видом деятельности на фоне других производств.

Основной причиной перехода к постлитий-ионной эре, в частности, к замене литий-ионных аккумуляторов натрий-ионными, считается потенциальный недостаток сырья. Не вдаваясь в подробности, можно провести следующую оценку. По данным, приведенным в [1], для изготовления одной батареи для электробуса энергоёмкостью 300 кВт·ч сырьевые потребности оцениваются как 149 кг меди, 118 кг алюминия, 123 кг марганца, 132 кг никеля, 125 кг графита, 48 кг лития и 132 кг кобальта (марганец, никель, литий и кобальт в виде соединений). По прогнозу [1] в 2030 г. планируется производство литий-ионных аккумуляторов для электромобилей с энергозапасом 3869 ГВт·ч. Для изготовления этих аккумуляторов потребуется 624 тонны лития и 1716 тонн кобальта. Мировые разведанные запасы лития оцениваются в 98 миллионов тонн, так что потребность в литии составит около 0.5% от мировых запасов. (Следует отметить, правда, что на производство литий-ионных аккумуляторов расходуется около половины всего производимого лития.) Мировые запасы кобальта оценива-

ются в 10 миллионов тонн, следовательно, на производство литий-ионных аккумуляторов в 2030 г. уйдёт около 17% мировых запасов, что может быть критичным.

СИТУАЦИЯ В РОССИИ

С момента коммерциализации литий-ионных аккумуляторов их мировое производство непрерывно возрастает. Одновременно постоянно снижается себестоимость их производства и повышаются их количественные характеристики, прежде всего, удельная энергия. Если характерная (усреднённая) удельная энергия литий-ионных аккумуляторов в первое десятилетие XXI века оценивалась в 60 Вт·ч/кг, то в 2010 г. она была уже близка к 90 Вт·ч/кг, в 2013 г. возросла до 140 Вт·ч/кг, а в 2020 г. – до 250 Вт·ч/кг. На 2030 г. ставится амбициозная задача достичь удельной энергии 400 (или даже 450) Вт·ч/кг. Себестоимость батареи литий-ионных аккумуляторов снижалась с 5000 долл./кВт·ч в начале 90-х гг. прошлого века до 2000 долл./кВт·ч в начале XXI века и до 200 долл./кВт·ч в 2020 г. Ближайшая задача – довести себестоимость производства до 100 долл./кВт·ч, что считается приемлемым для массового выпуска электромобилей.

Объём производства литий-ионных аккумуляторов в России за последние три десятилетия периодически увеличивался и снижался. Снижение производства было связано, в частности, с уходом с рынка таких производителей (в прошлом), как ОАО «НИАИ-Источник», НИЭЭИ, ОАО АК «Ригель». Последней акцией было банкротство ГК «Литеко» (бывший Лиотех).

Российская Национальная ассоциация производителей источников тока «РУСБАТ» объединяет 26 производителей источников тока, из них только АО «Верхнеуфалейский завод Уралэлемент» (г. Верхний Уфалей), АО Энергия (г. Елец) и ПАО «Сатурн» (Краснодар) официально производят литий-ионные аккумуляторы и являются предприятиями полного цикла. На разных конферен-

циях другие организации декларируют намерение производить литий-ионные аккумуляторы, но на их веб-сайтах конкретной информации нет (например, ИнЭнерджи, ООО «Энергоэлемент», ООО «РЭНЭРА»).

АО «Верхнеуфалейский завод Уралэлемент» выпускает литий-ионные аккумуляторы различных типоразмеров как в жёстких, так и в ламинатных корпусах [35]. В настоящее время завод выпускает цилиндрические аккумуляторы типоразмера 18650 ёмкостью от 1.8 до 2.8 А·ч и крупные цилиндрические аккумуляторы диаметром 50 мм ёмкостью от 20 до 27 А·ч, а также призматические аккумуляторы ёмкостью от 5.4 до 95 А·ч. Аккумуляторы в ламинатных корпусах имеют ёмкость от 2.5 до 35 А·ч. Объём производства достигает 20 МВт·ч/г, но большая часть выпускается по государственному заказу, а не на рынок.

АО «Энергия» выпускает литий-ионные аккумуляторы не только для спеццелей, но и для бытовой электроники [36]. Продукцию АО «Энергия» можно купить на различных торговых площадках, например Wildberries. Предприятие производит цилиндрические аккумуляторы типоразмеров 14507 (0.75 А·ч), 18650 (1.5–3 А·ч в зависимости от мощности) и 21700 (4.5 А·ч), а также призматические аккумуляторы в жёстком корпусе ёмкостью 72 А·ч и в ламинатных корпусах ёмкостью от 1.7 до 28 А·ч. АО «Энергия» способна поставлять до 50 литий-ионных батарей в месяц для электрокаров (около 6 МВт·ч/г). Выпускаемые литий-ионные аккумуляторы на 90% состоят из отечественного сырья и комплектующих. Но цена отечественного сырья на 40% выше, чем цена китайского.

ПАО «Сатурн» производит литий-ионные аккумуляторы только по госзаказу.

ООО «РЭНЭРА» (акроним словосочетания Росатом – энергоаккумулирующие решения) анонсировало строительство завода литий-ионных аккумуляторов общей производительностью 3 ГВт·ч (по другим данным 4 ГВт·ч) в г. Калининграде на площадке законсервированной Балтийской АЭС.

ООО «РЭНЕРА» приобрело 49% акций компании Epertech International Inc. – южнокорейского производителя электродов, литий-ионных аккумуляторов и системы хранения энергии. Предполагается, что завод будет введен в эксплуатацию в 2026 г. [37].

Таким образом, современный объём производства литий-ионных аккумуляторов в России составляет сотые доли процента от мирового производства. Главная причина слабого развития производства литий-ионных аккумуляторов сводится к отсутствию спроса со стороны производителей конечных продуктов, точнее, отсутствие таких производителей. Структура потребления литий-ионных аккумуляторов в России отстаёт на 10–15 лет от структуры потребления в развитых странах, и до сих пор большинство литий-ионных аккумуляторов в России используется в портативной электронной аппаратуре. В России производство такой аппаратуры отсутствует, и каждый потребитель старается использовать оригинальные источники питания.

В бюллетене Счетной палаты РФ «Недропользование» отмечается, что Россия обладает значительными сырьевыми запасами компонентов литий-ионных аккумуляторов. Однако большую часть этого сырья страна импортирует. Российская база ресурсов лития – одна из крупнейших в мире, литий обнаруживается в 16 месторождениях. Ресурсы лития в России оцениваются в 1–1.5 млн. т, страна находится на 10-м месте в мире. При этом не производится добыча лития для внутреннего рынка России. Вместо этого импортируется до 1500 т металла.

Запасы марганца и кобальта в России составляют около 3% от мировых запасов. Россия является одним из главных экспортёров алюминия. Так что принципиальных ресурсных ограничений в России нет. Однако коммерческое производство исходных материалов для литий-ионных аккумуляторов в России развито так же слабо, как и производство собственно аккумуляторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что в последние 10–15 лет огромные усилия тратятся на создание так называемых «пост-литий-ионных» аккумуляторов, развитие собственно литий-ионных аккумуляторов интенсивно продолжается, как в терминах улучшения технических характеристик, так и в терминах расширения производства. Характерная удельная энергия литий-ионных аккумуляторов уже доведена до 250 Вт·ч/кг и ставится амбициозная задача довести этот показатель к 2030 г. до 400 и даже до 450 Вт·ч/кг. За последнее время заметно меняется структура использования литий-ионных аккумуляторов: переход от энергообеспечения портативной электронной аппаратуры к созданию электротранспорта и крупных систем хранения энергии. Объём производства литий-ионных аккумуляторов в России составляет сотые доли процента от мирового производства, и в основном российские потребности удовлетворяются импортом. Прогнозируется, что к 2030 г. доля российских литий-ионных аккумуляторов может возрасти до 0.2% от мирового уровня.

REFERENCES

1. Hanne Flåten Andersen. Current and future trends within lithium-ion battery chemistry. *BATMAN webinar* (May 10, 2021), pp. 5. Available at: https://www.eydecluster.com/media/24747/210510_batman_webinar_ife.pdf (accessed June 18, 2023).
2. Grey C. P., Hall D. S. Prospects for lithium-ion batteries and beyond – a 2030 vision. *Nat. Commun.*, 2020, vol. 11, pp. 6279–6282. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19991-4>

3. Zubi G., Dufo-López R., Carvalho M., Pasaoglu G. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2018, vol. 89, pp. 292–308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.002>
4. Kim T., Song W., Son D.-Y., Ono L. K., Qi Y. Lithium-ion batteries: Outlook on present, future, and hybridized technologies. *J. Mater. Chem. A*, 2019, vol. 7, pp. 2942–2964. <https://doi.org/10.1039/c8ta10513h>

5. Qian J., Liu L., Yang J., Li S., Wang X., Zhuang H. L., Lu Y. Electrochemical surface passivation of LiCoO₂ particles at ultrahigh voltage and its applications in lithium-based batteries. *Nat. Commun.*, 2018, vol. 9, pp. 4918–4928. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07296-6>
6. Kalluri S., Yoon M., Jo M., Park S., Myeong S., Kim J., Dou S. X., Guo Z., Cho J. Surface Engineering Strategies of Layered LiCoO₂ Cathode Material to Realize High-Energy and High-Voltage Li-Ion Cells. *Adv. Energy Mater.*, 2016, vol. 7, article no. 1601507. <https://doi.org/10.1002/aenm.201601507>
7. Kong J.-Z., Xu L.-P., Wang C.-L., Jiang Y.-X., Cao Y.-Q., Zhou F. Facile coating of conductive poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) copolymer on Li_{1.2}Mn_{0.54}Ni_{0.13}Co_{0.13}O₂ as a high electrochemical performance cathode for Li-ion battery. *J. Alloys Compd.*, 2017, vol. 719, pp. 401–410. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.05.184>
8. Zhu W., Huang X., Liu T., Xie Z., Wang Y., Tian K., Bu L., Wang H., Gao L., Zhao J. Ultrathin Al₂O₃ Coating on LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂ Cathode Material for Enhanced Cycleability at Extended Voltage Ranges. *Coatings*, 2019, vol. 9, article no. 92. <https://doi.org/10.3390/coatings9020092>
9. Weigel T., Schipper F., Erickson E. M., Susai F. A., Markovsky B., Aurbach D. Structural and Electrochemical Aspects of LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂ Cathode Materials Doped by Various Cations. *ACS Energy Lett.*, 2019, vol. 4, pp. 508–516. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.8b02302>
10. Zhong W. W., Huang J., Liang S., Liu J., Li Y., Cai G., Jiang Y., Liu J. New Prelithiated V₂O₅ Superstructure for Lithium-Ion Batteries with Long Cycle Life and High Power. *ACS Energy Lett.*, 2020, vol. 5, pp. 31–38. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.9b02048>
11. Fan X., Hu E., Ji X., Zhu Y., Han F., Hwang S., Liu J., Bak S., Ma Z., Gao T., Liou S., Bai J., Yang X.-Q., Mo Y., Xu K., Su D., Wang C. High energy-density and reversibility of iron fluoride cathode enabled via an intercalation-extrusion reaction. *Nat. Commun.*, 2018, vol. 9, pp. 2324–2335. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04476-2>
12. Ni Q., Zheng L., Bai Y., Liu T., Ren H., Xu H., Wu C., Lu J. An Extremely Fast Charging Li₃V₂(PO₄)₃ Cathode at a 4.8 V Cutoff Voltage for Li-Ion Batteries. *ACS Energy Lett.*, 2020, vol. 5, pp. 1763–1770. <https://dx.doi.org/10.1021/acsenergylett.0c00702>
13. Ivanishchev A. V., Ushakov A. V., Ivanishcheva I. A., Churikov A. V., Mironov A. V., Fedotov S. S., Khasanova N. R., Antipov E. V. Structural and electrochemical study of fast Li diffusion in Li₃V₂(PO₄)₃-based electrode material. *Electrochim. Acta*, 2017, vol. 230, pp. 479–491. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.02.009>
14. Yuan M., Liu H., Ran F. Fast-charging cathode materials for lithium & sodium ion batteries. *Mater. Today*, 2023, vol. 63, pp. 360–379. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2023.02.007>
15. Lu K., Hu Z., Ma J., Ma H., Dai L., Zhang J. A rechargeable iodine-carbon battery that exploits ion intercalation and iodine redox chemistry. *Nat. Commun.*, 2017, vol. 8, pp. 527–536. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00649-7>
16. Wu C., Hu M., Yan X., Shan G., Liu J., Yang J. Azo-linked covalent triazine-based framework as organic cathodes for ultrastable capacitor-type lithium-ion batteries. *Energy Storage Mater.*, 2021, vol. 36, pp. 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.01.016>
17. Zhang X., Zhou W., Zhang M., Yang Z., Huang W. Superior performance for lithium-ion battery with organic cathode and ionic liquid electrolyte. *J. Energy Chem.*, 2021, vol. 52, pp. 28–32. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.04.053>
18. Yu Q., Tang W., Hu Y., Gao J., Wang M., Liu S., Lai H., Xu L., Fan C. Novel low-cost, high-energy-density (>700 Wh·kg⁻¹) Li-rich organic cathodes for Li-ion batteries. *Chem. Eng. J.*, 2021, vol. 415, article no. 128509. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128509>
19. Slesarenko A. A., Baymuratova G. R., Yakuschenko I. K., Tulibaeva G. Z., Vasil'ev S. G., Yudina A. V., Troshin P. A., Shestakov A. F., Yarmolenko O. V. New organic electrode materials for lithium batteries produced by condensation of cyclohexanehexone with *p*-phenylenediamine. *Synth. Met.*, 2022, vol. 289, article no. 117113. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2022.117113>
20. Gu Y., Yang S., Zhu G., Yuan Y., Qu Q., Wang Y., Zheng H. The effects of cross-linking cations on the electrochemical behavior of silicon anodes with alginate binder. *Electrochim. Acta*, 2018, vol. 269, pp. 405–414. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.02.168>
21. Yao Y., McDowell M. T., Ryu I., Wu H., Liu N., Hu L., Nix W. D., Cui Y. Interconnected Silicon Hollow Nanospheres for Lithium-Ion Battery Anodes with Long Cycle Life. *Nano Lett.*, 2011, vol. 11, pp. 2949–2954. <https://doi.org/10.1021/nl201470j>
22. Wu H., Yu G., Pan L., Liu N., McDowell M. T., Bao Z., Cui Y. Stable Li-ion battery anodes by *in-situ* polymerization of conducting hydrogel to conformally coat silicon nanoparticles. *Nat Commun.*, 2013, vol. 4, pp. 1943–1948. <https://doi.org/10.1038/ncomms2941>
23. Jia H., Zheng J., Song J., Luo L., Yi R., Estevez L., Zhao W., Patel R., Li X., Zhang J.-G. A novel approach to synthesize micrometer-sized porous silicon as a high performance anode for lithium-ion batteries. *Nano Energy*, 2018, vol. 50, pp. 589–597. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.05.048>
24. He D., Li P., Wang W., Wan Q., Zhang J., Xi K., Ma X., Liu Z., Zhang L., Qu X. Collaborative Design of Hollow Nanocubes, *In Situ* Cross-Linked Binder, and Amorphous Void@SiOx@C as a Three-Pronged Strategy for Ultrastable Lithium Storage. *Small*,

2019, vol. 15, article no. 1905736. <https://doi.org/10.1002/sml.201905736>

25. Wu H., Chan G., Choi J. W., Ryu I., Yao Y., McDowell M. T., Lee S. W., Jackson A., Yang Y., Hu L., Cui Y. Stable cycling of double-walled silicon nanotube battery anodes through solid-electrolyte interphase control. *Nat. Nanotechnol.*, 2012, vol. 7, pp. 310–315. <https://doi.org/10.1038/NNAN~O.2012.35>

26. Kulova T. L., Skundin A. M., Gavrilin I. M. Electrodes of Germanium and Germanium Phosphide Nanowires in Lithium-Ion and Sodium-Ion Batteries (A Review). *Russ. J. Electrochem.*, 2022, vol. 58, pp. 855–868. <https://doi.org/10.1134/S1023193522100081>

27. Wu S., Han C., Iocozzia J., Lu M., Ge R., Xu R., Lin Z. Germanium-Based Nanomaterials for Rechargeable Batteries. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2016, vol. 55, no. 28, pp. 7898–7922. <https://doi.org/10.1002/anie.201509651>

28. Klavetter K. C., Wood S. M., Lin Y.-M., Snider J. L., Davy N. C., Chockla A. M., Romanovicz D. K., Korgel B. A., Lee J.-W., Heller A., Mullins C. B. A high-rate germanium-particle slurry cast Li-ion anode with high Coulombic efficiency and long cycle life. *J. Power Sources*, 2013, vol. 238, pp. 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.02.091>

29. Gavrilin I. M., Kudryashova Yu. O., Kuz'mina A. A., Kulova T. L., Skundin A. M., Emets V. V., Volkov R. L., Dronov A. A., Borgardt N. I., Gavrilov S. A. High-rate and low-temperature performance of germanium nanowires anode for lithium-ion batteries. *J. Electroanal. Chem.*, 2021, vol. 888, article no. 115209. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115209>

30. Kulova T. L., Skundin A. M. Renaissance of lithium electrode. *Electrochemical Energetics*, 2023,

vol. 23, no. 2, pp. 57–79 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-2-57-79>

31. Heubner C., Maletti S., Auer H. Hüttel J., Voigt K., Lohrberg O., Nikolowski K., Partsch M., Michaelis A. From Lithium-Metal toward Anode-Free Solid-State Batteries: Current Developments, Issues, and Challenges. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, vol. 31, article no. 2106608. <https://doi.org/10.1002/adfm.202106608>

32. Yang Y., Davies D. M., Yin Y., Borodin O., Lee J. Z., Fang C., Olguin M., Zhang Y., Sablina E. S., Wang X., Rustomji C. S., Meng Y. S. High-Efficiency Lithium-Metal Anode Enabled by Liquefied Gas Electrolytes. *Joule*, 2019, vol. 3, pp. 1986–2000. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.06.008>

33. Saal A., Hagemann T., Schubert U. S. Polymers for Battery Applications—Active Materials, Membranes, and Binders. *Adv. Energy Mater.*, 2020, vol. 10, article no. 2001984.

34. Voropaeva D. Yu., Novikova S. A., Kulova T. L., Yaroslavtsev A. B. Conductivity of Nafion-117 membranes intercalated by polar aprotic solvents. *Ionics*, 2018, vol. 24, pp. 1685–1692. <https://doi.org/10.1007/s11581-017-2333-1>

35. *Verkhneufaleiskii zavod Uralelement* (Verkhneufalei plant Uralelement. Site). Available at: <https://www.uralelement.ru/> (accessed June 18, 2023).

36. *JSC “Energiya”*. (Site). Available at: <https://www.jsc-energiya.com/> (accessed June 18, 2023).

37. Rosatom started construction of Russia’s first “gigafactory” of energy storage devices in the Kaliningrad region. *Nauchno-delovoi portal “Atomnaya energiya 2.0”* (Scientific and business portal “Nuclear Energy 2.0”). Site). Available at: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/10/14/129293> (accessed June 18, 2023).

Поступила в редакцию 27.07.2023; одобрена после рецензирования 10.08.2023; принята к публикации 15.09.2023
The article was submitted 27.07.2023; approved after reviewing 10.08.2023; accepted for publication 15.09.2023