

Научная статья
УДК 544.623
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.020

О СИНТЕЗЕ ЛИТИЙ-ИОННОГО ПРОВОДНИКА $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ТИТАНА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ПЕРОВСКИТА

Ирина Витальевна Бочарова¹, Галина Борисовна Куншина², Екатерина Сергеевна Щукина³

^{1, 2, 3}Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

¹g.kunshina@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6530-7607>

²i.bocharova@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2421-4295>

³e.shchukina@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1018-0012>

Аннотация

Впервые представлены результаты твердофазного синтеза литий-ионного проводника состава $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$ (LATP) с использованием в качестве исходного компонента диоксида титана, полученного из перовскитового концентрата. Невысокие значения ионной проводимости LATP при комнатной температуре ($4,4 \cdot 10^{-5}$ См/см), измеренные методом импедансной спектроскопии, обусловлены наличием минерализованной примесной фазы CaTiO_3 (~3–4 %). Изучена температурная зависимость ионной проводимости LATP в интервале 25–150 °С и определена энергия активации проводимости (0,35 эВ).

Ключевые слова:

перовскит, диоксид титана, литийпроводящий твердый электролит, синтез, ионная проводимость

Финансирование:

статья выполнена при поддержке федерального бюджета по теме государственного задания Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева Кольского научного центра Российской академии наук № FMEZ-2025-0056.

Для цитирования:

Бочарова И. В., Куншина Г. Б., Щукина Е. С. О синтезе литий-ионного проводника $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$ на основе диоксида титана, полученного из перовскита // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 121–126. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.020.

Original article

ON THE SYNTHESIS OF $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$ LITHIUM-ION CONDUCTOR BASED ON TITANIUM DIOXIDE OBTAINED FROM PEROVSKITE

Irina V. Bocharova¹, Galina B. Kunshina², Ekaterina S. Shchukina³

^{1, 2, 3}Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre
“Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

¹g.kunshina@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6530-7607>

²i.bocharova@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2421-4295>

³e.shchukina@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1018-0012>

Abstract

For the first time, the results of solid-phase synthesis of lithium-ion conductor of composition $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$ (LATP) using titanium dioxide as the initial component are presented. Titanium dioxide has been obtained from perovskite concentrate. The low values of the ionic conductivity of LATP at room temperature ($4,4 \times 10^{-5}$ S/cm) measured by impedance spectroscopy are due to the presence of the mineralized impurity phase CaTiO_3 (~3–4 %). The temperature dependence of the ionic conductivity of LATP in the range of 25–150 °C has been studied, and the activation energy of the conductivity (0,35 eV) has been determined.

Keywords:

perovskite, titanium oxide, lithium-conducting solid electrolyte, synthesis, ionic conductivity

Funding:

The article was supported by the federal budget on the topic of the state assignment of the Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences” No. FMEZ-2025-0056.

For citation:

Bocharova I. V., Kunshina G. B., Shchukina E. S. On the synthesis of $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$ lithium-ion conductor based on titanium dioxide obtained from perovskite // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 121–126. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.020.

Для практического применения литий-ионных проводников необходимо, чтобы они соответствовали ряду требований, среди которых: высокая ионная проводимость при комнатной температуре ($>0,1$ мСм/см); униполярная катионная проводимость; химическая и электрохимическая устойчивость при контакте с металлическим литием и электродными материалами; низкая электронная проводимость (чтобы минимизировать саморазряд); термическая стабильность. Замещенные титанофосфаты лития $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$ интенсивно изучаются в качестве литий-ионных проводников с целью использования их в мембранах, композитных электродах и электролитах в твердотельных электрохимических устройствах [1]. Ранее был разработан способ синтеза твердого электролита состава $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$ (LATP) со структурой NASICON с высокой Li-ионной проводимостью с использованием стандартных коммерческих реактивов марок «хч» и «осч» [2]. В настоящее время исследователи [3; 4] рассматривают перспективы использования для синтеза твердых электролитов с литий-ионной проводимостью технологических прекурсоров в качестве альтернативных исходных компонентов. Такой подход позволит снизить затраты, обеспечить производство в соответствии с принципами зеленой экономики и создать условия для коммерциализации литийпроводящих твердых электролитов.

Цель настоящей работы — изучение потенциальной возможности использования диоксида титана, полученного в результате переработки перовскитового концентрата, для синтеза литий-ионного проводника состава $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$ (LATP)

Экспериментальная часть

Для синтеза литийпроводящего твердого электролита LATP успешно применяются разнообразные методы (твердофазное спекание, закалка расплава, соосаждение, гидротермальный, микроволновый, золь-гель методы). Наиболее распространенными в качестве источника титана (в зависимости от метода синтеза) являются TiO_2 рутильной или анатазной модификации, гидроксид $\text{TiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, титанилсульфат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{TiO}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ или алкоксиды титана $\text{Ti}(\text{OR})_4$ [5; 6].

Мы впервые использовали в качестве источника титана диоксид титана TiO_2 , полученный в результате переработки перовскита CaTiO_3 по азотнокислотной технологии [7; 8]. Измельченный перовскитовый концентрат загружали в лабораторный реактор, роль которого выполняла трехгорлая стеклянная колба, снабженная обратным холодильником, терморегулятором и мешалкой. Колба помещалась в колбонагреватель. В реакторе находился раствор 45 %-й (575,2 г/л) азотной кислоты, соотношение Т:Ж = 1:1,4. Процесс разложения проводили в течение 20 ч, температура кипения 110–112 °С. По окончании процесса суспензию охлаждали и фильтровали под вакуумом. Полученный гидратный продукт (осадок) тщательно промывали водой с удалением (репульпацией) кислого маточного раствора и сушили на воздухе.

Фазовый состав твердого электролита LATP определяли с использованием дифрактометра XRD-6000 Shimadzu (CuK_α -излучение, графитовый монохроматор).

Спектры электрохимического импеданса регистрировали импедансметром Z-2000 в диапазоне частот $10\text{--}2 \cdot 10^6$ Гц с амплитудой переменного сигнала 0,1 В. Образцы для электрофизических измерений готовили в виде прессованных цилиндрических таблеток ($d = 10\text{--}11$ мм, $h = 1,5\text{--}2$ мм), на торцы которых после спекания при 800–900 °С наносили графитовые электроды. Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания (на электронных весах ЛВ-210А с точностью 0,001 г), основанным на двукратном взвешивании твердого тела — сначала в воздухе, а затем в жидкости с известной плотностью. Плотность образца рассчитывали по формуле:

$$\rho = \frac{m_{\text{возд}}}{m_{\text{возд}} - m_{\text{вода}}} \cdot \rho_{\text{вода}},$$

где $m_{\text{возд}}$ — масса образца в воздухе; $m_{\text{вода}}$ — масса образца в воде; $\rho_{\text{вода}}$ — плотность воды, г/см³. Плотность спеченных таблеток достигала 89–90 % от теоретической (2,95 г/см³).

Ионную проводимость LATP изучали методом импедансной спектроскопии в диапазоне частот $10^3\text{--}2 \cdot 10^6$ Гц с амплитудой переменного сигнала 0,1 В с использованием импедансметра Z-2000 (Elins). Значение удельной ионной проводимости (σ) рассчитывали с учетом геометрических размеров по формуле:

$$\sigma = \frac{4h}{R\pi d^2}, \quad (1)$$

где h — толщина таблетки; d — диаметр таблетки; R — сопротивление таблетки.

В интервале 25–150 °С была изучена температурная зависимость ионной проводимости и определена энергия активации LATP. Значения энергии активации ионной проводимости были рассчитаны по уравнению Аррениуса:

$$\sigma = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (2)$$

где E_a — энергия активации; A — предэкспоненциальный коэффициент; T — абсолютная температура; R — газовая постоянная.

Результаты и обсуждение

В качестве исходных веществ для синтеза $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$ (LATP) использовали Li_2CO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ «х. ч.», $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ «х. ч.». В качестве титансодержащего компонента использовали гидратный продукт, полученный при переработке перовскитового концентрата, с известным содержанием TiO_2 (таблица).

Содержание оксидов в технологических продуктах

Технологический продукт	Содержание, мас. %						Растворимость в $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$
	TiO_2	Fe_2O_3	Nb_2O_5	CaO	SiO_2	Вода, %	
TiO_2 из перовскита CaTiO_3	88,6	5	1,33	1	2,36	1,7	Нет
$\text{TiO}(\text{OH})_2$ из титанита CaTiSiO_5	72,5	0,21	0,09	—	0,0072	27	Да

В ходе предыдущих исследований были проведены опыты по жидкофазному синтезу LATP с использованием анатазной модификации гидроксида титана $\text{TiO}(\text{OH})_2$, полученного при переработке титанита CaTiSiO_5 , хорошо растворимого в щавелевой кислоте с образованием комплекса $\text{H}_2[\text{TiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]$ [9]. Однако полученный из перовскита диоксид титана рутильной модификации не растворяется в щавелевой кислоте. Согласно результатам РФА после прокаливании при 700 °С диоксид титана содержал ~10 % минерализованной примеси CaTiO_3 (рис. 1). В этой связи была предпринята попытка синтезировать LATP твердофазным методом. Синтез был осуществлен путем высокотемпературного спекания смеси исходных веществ.

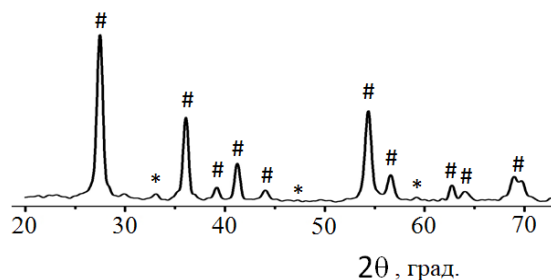


Рис. 1. Дифрактограмма прокаленного при 700 °С TiO_2 (#) рутильной модификации, полученного из перовскита по азотнокислотной технологии. * — CaTiO_3 (ICDD 04-005-5592)

Состав шихты рассчитывали по стехиометрии реакции:



Стехиометрическую смесь исходных компонентов помещали в муфельную печь МИМП-3П с программным управлением и нагревали со скоростью 10 °С/мин до 290 °С с изотермической выдержкой в течение 1 ч. При этой температуре происходило вспенивание реакционной смеси с удалением газообразных продуктов (NH_3 , H_2O , CO_2). Далее реакционную массу измельчали на шаровой мельнице КМ1 в течение 1 ч и прессовали усилием 100 МПа в таблетки, которые отжигали

при 800 °С в течение 2 ч. После отжига таблетки вновь измельчали, из полученного порошка прессовали таблетки ($d = 10\text{--}11$ мм, $h = 1,5\text{--}2$ мм), которые спекали в муфельной печи при 900 °С в течение 2 ч для последующего измерения электрофизических характеристик LATP.

Согласно результатам РФА после отжига шихты при 800 °С на дифрактограммах (рис. 2, а) наряду с основным количеством LATP (ICDD 00-066-0868) в результате твердофазного взаимодействия формируется примесное соединение фосфата алюминия AlPO_4 (рефлекс при $21,7^\circ$). Авторы [10] также отмечали, что образование примесной фазы фосфата алюминия является неизбежным при синтезе LATP. При дальнейшем повышении температуры до 900 °С образуется хорошо окристаллизованная фаза LATP со структурой NASICON (рис. 2, б), содержащая незначительное количество ($\sim 3\%$) примесных фаз AlPO_4 и CaTiO_3 (рефлекс на рентгенограмме при $32,3^\circ$ в наложении).

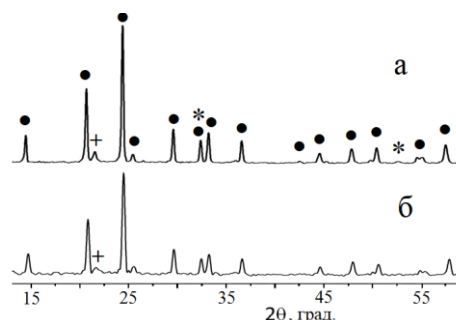


Рис. 2. Дифрактограмма LATP после спекания при 800 °С (а) и 900 °С (б):
+ — AlPO_4 (ICDD 04-009-6534); * — CaTiO_3 (ICDD 04-005-5592)

На рисунке 3, а представлены спектры электрохимического импеданса керамического LATP, измеренные при различной температуре в интервале частот $10^3\text{--}2\cdot 10^6$ Гц, которые состояли из высокочастотного полукруга и прямой линии (луча), соответствующей измерениям импеданса на низких частотах, как на стандартных графиках Найквиста. Анализ данных показывает, что с увеличением температуры наблюдается последовательное снижение сопротивления и смещение годографов импеданса к началу координат. Величина общего сопротивления (R_{total}) твердого электролита LATP определялась методом экстраполяции правой части полуокружности на ось активных сопротивлений (Z'). Результаты демонстрируют, что при повышении температуры общая ионная проводимость σ_{total} , рассчитанная по формуле (1), возрастает с $4,4\cdot 10^{-5}$ до $1,4\cdot 10^{-3}$ См/см. Низкая ионная проводимость при комнатной температуре обусловлена наличием примесной фазы фосфата алюминия, которая локализуется на границах кристаллических зерен и существенно ограничивает миграцию ионов Li^+ . Это явление, известное как зернограничное сопротивление, является ключевым фактором, ограничивающим транспортные свойства LATP.

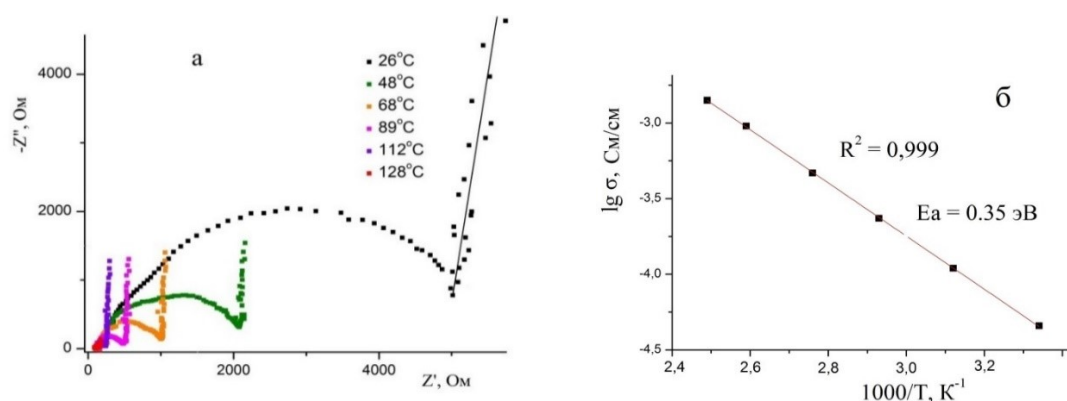


Рис. 3. Годографы импеданса LATP, измеренные в интервале 25–130 °С (а),
температурная зависимость ионной проводимости LATP (б)

На рисунке 3, б представлена зависимость ионной проводимости LATP после спекания при 900 °С в координатах Аррениуса. График зависимости $\lg \sigma_{\text{total}}$ от $1000/T$ представляет собой прямую линию с коэффициентом детерминации $R^2 \geq 0,99$. Вычисленная энергия активации проводимости E_a составила 0,35 эВ, что указывает на высокую подвижность ионов Li^+ в твердом электролите и согласуется с литературными данными [11]. Электронная проводимость LATP, измеренная методом потенциостатической хроноамперометрии, не превышала $1 \cdot 10^{-9}$ См/см.

Заключение

Впервые показана принципиальная возможность использования диоксида титана, полученного в результате переработки перовскитового концентрата, в качестве исходного материала для синтеза литий-ионного проводника состава $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$ (LATP). Установлено, что твердофазный синтез обеспечивает образование целевого продукта после спекания при 900 °С. Общая ионная проводимость LATP увеличивается с $4,4 \cdot 10^{-5}$ См/см (при комнатной температуре) до $1,4 \cdot 10^{-3}$ См/см (при 130 °С), энергия активации составила 0,35 эВ. Для достижения высокой ионной проводимости необходимо снизить содержание примесных фаз в диоксиде титана, полученном в результате переработки перовскитового концентрата.

Список источников

1. Yin J.-H., Zhu H., Yu S.-J., Dong Y.-B., Wei Q.-Y., Xu G.-Q., Xiong Y., Qian Y. Recent Advances of LATP and Their NASICON Structure as a Solid-State Electrolyte for Lithium-Ion Batteries // *Adv. Eng. Mater.* 2023. Vol. 25. 2300566.
2. Kunshina G. B., Efremov V. V., Lokshin E. P. Microstructure and Ionic Conductivity of Lithium-Aluminum Titanophosphate // *Russ. J. Electrochem.*, 2013. Vol. 49. P. 725–731.
3. Oeza B. R., Hapsari A. U., Raharjo J., Damisih, Pravitarsari R. D., Deni Y., Agustanhakri, Widyastuti, Noerochim L., Suyanti, Arifin K., Somalu M. R. Impact of diverse material precursors on microstructure and ionic conductivity $\text{Li}_{0,33}\text{La}_{0,56}\text{TiO}_3$ solid-state electrolyte properties // *J. Alloys Compd.* 2024. Vol. 1006. 2176169.
4. Касиков А. Г., Щелокова Е. А., Куншина Г. Б., Бочарова И. В., Кузнецов И. А. Получение карбоната лития из сподуменового концентрата Колмозерского месторождения и его использование при синтезе твердого электролита // *Разведка и охрана недр.* 2024. № 2. С. 81–88.
5. Kunshina G. B., Gromov O. G., Kuz'min A. P., Seitenova E. B., Lokshin E. P., and Kalinnikov V. T. Synthesis and Ionic Conductivity of Lithium-conducting Titanium Phosphate Solid Electrolytes // *Russ. J. Appl. Chem.* 2004. Vol. 77. P. 915–920.
6. Stenina I., Pyrkova A., Yaroslavl'tsev A. NASICON-Type $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Zr}_y\text{Ti}_{2-x-y}(\text{PO}_4)_3$ Solid Electrolytes: Effect of Al, Zr Co-Doping and Synthesis Method // *Batteries.* 2023. Vol. 9. 59.
7. Николаев А. И., Герасимова Л. Г., Петров В. Б., Майоров В. Г. Перовскитовый концентрат — перспективное нетрадиционное сырье для производства титановой и редкометалльной продукции // *Комплексное использование минерального сырья.* 2015. № 2 (293). С. 26–34.
8. Герасимова Л. Г., Николаев А. И., Петров В. Б., Бычеля Ю. Г. Азотнокислотное разложение перовскита в присутствии фторсодержащего реагента // *Цветные металлы.* 2017. № 5. С. 50–53.
9. Kunshina G. B., Bocharova I. V. Synthesis of $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$ solid electrolyte from oxalate precursor // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2025. Vol. 70. P. 812–820.
10. Kim C. G., Hong Y. T., Im J. M., Baek K. S., Lim Y. R., Kim H.-J., Park H., Baek S.-W., Kim J. H. Ionic conductivity and microstructural characteristics of NASICON-type solid electrolyte $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$ affected by synthesis and manufacturing processes for all solid-state battery // *J. Korean Ceram. Soc.* 2024. Vol. 61. P. 1091–1101.
11. Yao Z., Zhu K., Zhang J., Li X., Chen J., Wang J., Yan K., Liu J. Co-Precipitation Synthesis and Electrochemical Properties of NASICON-Type $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$ Solid Electrolytes // *J. Mater. Sci: Mater. Electron.* 2021. Vol. 32. P. 24834–24844.

References

1. Yin J.-H., Zhu H., Yu S.-J., Dong Y.-B., Wei Q.-Y., Xu G.-Q., Xiong Y., Qian Y. Recent Advances of LATP and Their NASICON Structure as a Solid-State Electrolyte for Lithium-Ion Batteries. *Adv. Eng. Mater.*, 2023, Vol. 25, 2300566.
2. Kunshina G. B., Efremov V. V., Lokshin E. P. Microstructure and Ionic Conductivity of Lithium-Aluminum Titanophosphate. *Russ. J. Electrochem.*, 2013, Vol. 49, pp. 725–731.

3. Oeza B. R., Hapsari A. U., Raharjo J., Damisih, Pravitasari R. D., Deni Y., Agustanhakri, Widyastuti, Noerochim L., Suyanti, Arifin K., Somalu M. R. Impact of diverse material precursors on microstructure and ionic conductivity $\text{Li}_{0.33}\text{La}_{0.56}\text{TiO}_3$ solid-state electrolyte properties. *J. Alloys Compd.*, 2024, Vol. 1006, 2176169.
4. Kasikov A. G., Shchelokova E. A., Kunshina G. B., Bocharova I. V., Kuznetsov I. A. Poluchenie karbonata litiya iz spodumenovogo koncentrata Kolmozerskogo mestorozhdeniya i ego ispol'zovanie pri sinteze tverdogo elektrolita [Preparation of lithium carbonate from spodumene concentrate of the Kolmozersky deposit and its use in the synthesis of solid electrolyte]. *Razvedka i ohrana nedr* [Exploration and protection of mineral resources], 2024, No. 2, pp. 81–88. (In Russ.).
5. Kunshina G. B., Gromov O. G., Kuz'min A. P., Seitenova E. B., Lokshin E. P., and Kalinnikov V. T. Synthesis and Ionic Conductivity of Lithium-conducting Titanium Phosphate Solid Electrolytes. *Russ. J. Appl. Chem.*, 2004, Vol. 77, pp. 915–920.
6. Stenina I., Pyrkova A., Yaroslavl'tsev A. NASICON-Type $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Zr}_y\text{Ti}_{2-x-y}(\text{PO}_4)_3$ Solid Electrolytes: Effect of Al, Zr Co-Doping and Synthesis Method. *Batteries*, 2023, Vol. 9, 59.
7. Nikolaev A. I., Gerasimova L. G., Petrov V. B., Mayorov V. G. Perovskitovyy koncentrat—perspektivnoe netraditsionnoe syr'e dlya proizvodstva titanovoj i redkometall'noj produktsii [Perovskite concentrate is a promising non-traditional raw material for the production of titanium and rare metal products]. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya* [Integrated use of mineral raw materials], 2015, No. 2 (293), pp. 26–34. (In Russ.).
8. Gerasimova L. G., Nikolaev A. I., Petrov V. B., Bychenya Yu. G. Azotnokislotnoe razlozhenie perovskita v prisutstvii ftorsoderzhashchego reagenta [Nitric acid decomposition of perovskite in the presence of a fluorinated reagent]. *Cvetnye metally* [Non-ferrous metals], 2017, No. 5, pp. 50–53. (In Russ.).
9. Kunshina G. B., Bocharova I. V. Synthesis of $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ solid electrolyte from oxalate precursor. *Russ. J. Inorg. Chem.*, 2025, Vol. 70, pp. 812–820.
10. Kim C. G., Hong Y. T., Im J. M., Baek K. S., Lim Y. R., Kim H.-J., Park H., Baek S.-W., Kim J. H. Ionic conductivity and microstructural characteristics of NASICON-type solid electrolyte $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ affected by synthesis and manufacturing processes for all solid-state battery. *J. Korean Ceram. Soc.*, 2024, Vol. 61, pp. 1091–1101.
11. Yao Z., Zhu K., Zhang J., Li X., Chen J., Wang J., Yan K., Liu J. Co-Precipitation Synthesis and Electrochemical Properties of NASICON-Type $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ Solid Electrolytes. *J. Mater. Sci: Mater. Electron.*, 2021, Vol. 32, pp. 24834–24844.

Информация об авторах

И. В. Бочарова — младший научный сотрудник;

Г. Б. Куншина — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;

Е. С. Щукина — кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

I. V. Bocharova — Research Assistant;

G. B. Kunshina — PhD (Engineering), Leading Researcher;

E. S. Shchukina — PhD (Engineering), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 05.06.2025; одобрена после рецензирования 05.06.2025; принята к публикации 19.06.2025.
The article was submitted 05.06.2025; approved after reviewing 05.06.2025; accepted for publication 19.06.2025.