

Научная статья  
УДК 544.623  
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.040

## СИНТЕЗ ЛИТИЙПРОВОДЯЩЕГО ТВЕРДОГО ЭЛЕКТРОЛИТА $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОКСИДА ТИТАНА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ТИТАНИТА $\text{CaTiSiO}_5$

Галина Борисовна Куншина<sup>1</sup>, Ирина Витальевна Бочарова<sup>2</sup>,  
Екатерина Сергеевна Щукина<sup>3</sup>, Лидия Георгиевна Герасимова<sup>4</sup>

<sup>1–4</sup>Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева  
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

<sup>1</sup>[g.kunshina@ksc.ru](mailto:g.kunshina@ksc.ru), <http://orcid.org/0000-0002-6530-7607>

<sup>2</sup>[i.bocharova@ksc.ru](mailto:i.bocharova@ksc.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2421-4295>

<sup>3</sup>[e.shchukina@ksc.ru](mailto:e.shchukina@ksc.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1018-0012>

<sup>4</sup>[l.gerasimova@ksc.ru](mailto:l.gerasimova@ksc.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7609-4651>

### Аннотация

Представлены результаты синтеза из оксалатного прекурсора литийпроводящего твердого электролита состава  $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$  (LATP) с использованием в качестве исходного компонента гидроксида титана  $\text{TiO}(\text{OH})_2$ , полученного из титанита  $\text{CaTiSiO}_5$ . Значения удельной ионной проводимости LATP при комнатной температуре, измеренные методом импедансной спектроскопии, составляли  $1,1 \cdot 10^{-4}$  См/см, что соответствует значениям для твердых электролитов указанного состава. Изучена температурная зависимость ионной проводимости LATP в интервале 25–150 °С и определена энергия активации проводимости (0,23 эВ). Основываясь на электрохимических характеристиках, делается вывод, что синтезированные твердые электролиты являются перспективными материалами для твердотельных литий-ионных аккумуляторов.

### Ключевые слова:

титанит, гидроксид титана, литийпроводящие твердые электролиты, 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:

Синтез литийпроводящего твердого электролита  $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$  с использованием гидроксида титана, полученного из титанита  $\text{CaTiSiO}_5$  / Г. Б. Куншина [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 1. С. 225–231. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.040.

Original article

## SYNTHESIS OF LITHIUM CONDUCTING SOLID ELECTROLYTE $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$ USING TITANIUM HYDROXIDE OBTAINED FROM $\text{CaTiSiO}_5$ TITANITE

Galina B. Kunshina<sup>1</sup>, Irina V. Bocharova<sup>2</sup>, Ekaterina S. Shchukina<sup>3</sup>, Lidiya G. Gerasimova<sup>4</sup>

<sup>1–4</sup> Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

<sup>1</sup>[g.kunshina@ksc.ru](mailto:g.kunshina@ksc.ru), <http://orcid.org/0000-0002-6530-7607>

<sup>2</sup>[i.bocharova@ksc.ru](mailto:i.bocharova@ksc.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2421-4295>

<sup>3</sup>[e.shchukina@ksc.ru](mailto:e.shchukina@ksc.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1018-0012>

<sup>4</sup>[l.gerasimova@ksc.ru](mailto:l.gerasimova@ksc.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7609-4651>

### Abstract

The results of the synthesis of lithium-conducting solid electrolyte  $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$  (LATP) from an oxalate precursor using titanium hydroxide  $\text{TiO}(\text{OH})_2$  as the initial component are presented. It is obtained from titanite  $\text{CaTiSiO}_5$ . The specific ionic conductivity values of LATP at room temperature measured by impedance spectroscopy were  $1,1 \cdot 10^{-4}$  S/cm. This corresponds to the values for solid electrolytes of the specified composition. The temperature dependence of LATP ionic conductivity was studied in the range of 25–150 °C, and the activation energy for conductivity was determined (0.23 eV). Based on the electrochemical characteristics, synthesized solid electrolytes are promising materials for solid-state lithium-ion batteries.

### Keywords:

titanite, titanium hydroxide, lithium-conducting solid electrolytes, 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:

Synthesis of lithium conducting solid electrolyte  $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$  using titanium hydroxide obtained from  $\text{CaTiSiO}_5$  titanite / G. B. Kunshina [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 225–231. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.040.

В последнее десятилетие замещенные титанофосфаты лития  $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$  интенсивно изучаются в качестве литийпроводящих твердых электролитов с целью использования их в мембранах, композитных электродах и электролитах, в твердотельных электрохимических устройствах [1]. Мы разработали 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 реактивов марок «хч» и «осч» [2].

В настоящее время мы последовательно изучаем возможность использования для синтеза твердых электролитов с литий-ионной проводимостью технологических прекурсоров в качестве исходных компонентов. Так, в работе [3] была показана возможность синтеза монофазных порошков твердого электролита номинального состава  $\text{Li}_{6.4}\text{Al}_{0.2}\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$  (LLZO) со структурой граната с использованием в качестве одного из исходных компонентов  $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ , полученного в результате переработки бадделеитового концентрата АО «Ковдорский ГОК». Далее был изучен процесс синтеза порошков твердых электролитов со структурой NASICON состава  $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$  (LATP) и  $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ge}_{1.5}(\text{PO}_4)_3$  (LAGP) с использованием  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , полученного в результате переработки сподуменового концентрата Колмозерского месторождения. Установлено, что применение  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  (без дополнительной очистки) при синтезе LATP и LAGP обеспечивает образование монофазного продукта в соответствии с разработанной технологической схемой [4]. Электрохимические характеристики сопоставимы с таковыми для твердых электролитов, синтезированных с использованием стандартных реактивов. Этот результат можно объяснить относительно невысоким содержанием  $\text{Li}_2\text{O}$  (5,06–5,36 мас. %) в целевом продукте (табл. 1). Поскольку основное содержание в твердом электролите LATP составляют оксиды  $\text{TiO}_2$  (35,4 мас. %) и  $\text{P}_2\text{O}_5$  (55,5 мас. %), представляет интерес изучить синтез с использованием гидроксида титана, полученного при переработке титанита  $\text{CaTiSiO}_5$ .

Таблица 1

Содержание оксидов в твердых электролитах со структурой NASICON

| Li-ТЭЛ                                                         | Содержание, мас. %    |                |                         |                |                        |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------|-------------------------|----------------|------------------------|
|                                                                | $\text{Li}_2\text{O}$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{GeO}_2$ | $\text{P}_2\text{O}_5$ |
| $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ | 5,06                  | 35,42          | 3,99                    | —              | 55,52                  |
| $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ge}_{1.5}(\text{PO}_4)_3$ | 5,36                  | —              | 6,10                    | 37,56          | 50,97                  |

Цель настоящей работы заключалась в изучении возможности использования гидроксида титана  $\text{TiO}(\text{OH})_2$ , полученного в результате переработки минерала титанита  $\text{CaTiSiO}_5$ , в качестве прекурсора при синтезе литийпроводящего твердого электролита состава  $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$  (LATP) с высокими электрохимическими характеристиками.

#### Экспериментальная часть

Наиболее распространенными для синтеза LATP в качестве источника титана (в зависимости от метода) являются  $\text{TiO}_2$  рутильной или анатазной модификации, гидроксид  $\text{TiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  или алкоксиды титана  $\text{Ti}(\text{OR})_4$  [5]. Авторы [6] протестировали для синтеза  $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ti}_{1.5}(\text{PO}_4)_3$  методом ионного обмена фосфат титана  $\text{Ti}(\text{HPO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , полученный из титанита. Мы использовали гидроксид  $\text{TiO}(\text{OH})_2$ , полученный в результате переработки титанита  $\text{CaTiSiO}_5$  по сернокислотной технологии. В раствор

серной кислоты (550–650 г/л  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), нагретый до 80–90 °С, добавляли концентрат, массовый расход которого по отношению к объему серной кислоты соответствовал отношению  $T : V_{\text{ж}} = 1:3$ . Суспензию нагревали и выдерживали в режиме кипения при перемешивании в течение 10 ч с возвратом парогазовой фазы в зону реакции. По окончании указанного времени суспензию охлаждали и отделяли жидкую фазу от продуктов реакции и нескрытых частиц концентрата [7]. Из полученного титансодержащего раствора методом кристаллизации выделяли аммоний титанилсульфат. Далее соль растворяли и методом «аммиачного» гидролиза получали гидроксид титана(IV). Процесс гидролиза проводили путем постепенного введения 2 % раствора аммиака в титановый раствор при постоянном перемешивании реакционной массы. Процесс вели до полной нейтрализации ( $\text{pH} = 5\text{--}5,5$ ). Затем фильтрованием под вакуумом отделяли твердую фазу и тщательно промывали водой. Полученный осадок сушили на воздухе при комнатной температуре [8].

Фазовый состав твердого электролита LATP определяли с использованием дифрактометра XRD-6000 Shimadzu ( $\text{CuK}_\alpha$ -излучение, графитовый монохроматор).

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). Образцы готовили в виде прессованных цилиндрических таблеток, на торцы которых после спекания при температуре 900 °С наносили графитовые электроды. Плотность таблеток рассчитывали как частное от деления массы образца на его объем, вычисленный из геометрических размеров цилиндрической таблетки. Размеры предварительно отшлифованного образца измеряли микрометром с точностью 0,01 мм, таблетку взвешивали на электронных весах ЛВ-210А с точностью 0,001 г. Значение удельной ионной проводимости ( $\sigma$ ) 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. Ячейку С/LATP/С помещали в сушильный шкаф, нагревали со скоростью 0,5 град/мин, термостатировали в течение 10 мин, затем записывали годограф (графическая зависимость  $Z'-Z''$  в координатах Найквиста), по которому определяли значение ионной проводимости при данной температуре. 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

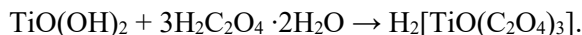
Твердый электролит номинального состава  $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$  синтезировали из жидкофазного оксалатного прекурсора. Преимущества метода описаны в [9]. В качестве исходных веществ для синтеза LATP использовали  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  хч,  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  ос. ч.,  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  хч,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  хч и гидроксид титана  $\text{TiO}(\text{OH})_2$ , полученный в результате переработки титанита  $\text{CaTiSiO}_5$ . Содержание оксида титана составляло 72,5 мас. % (табл. 2).

Таблица 2

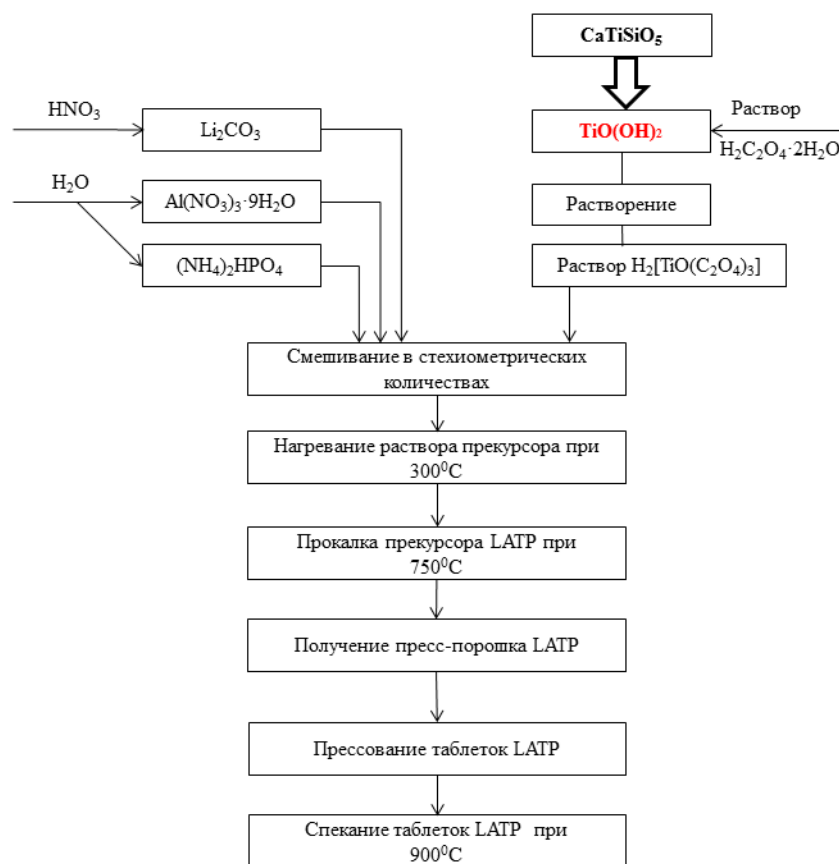
Содержание оксидов в технологических продуктах

|                                               | Содержание, мас. % |              |                |                         |                         |
|-----------------------------------------------|--------------------|--------------|----------------|-------------------------|-------------------------|
|                                               | $\text{TiO}_2$     | $\text{CaO}$ | $\text{SiO}_2$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{Nb}_2\text{O}_5$ |
| $\text{CaTiSiO}_5$                            | 37,5               | 30,3         | 30,4           | 0,27                    | 0,41                    |
| $\text{TiO}(\text{OH})_2$ (сушили на воздухе) | 72,5               | —            | 0,007          | 0,21                    | 0,09                    |

Гидроксид титана растворяли в 1,2 М щавелевой кислоте:



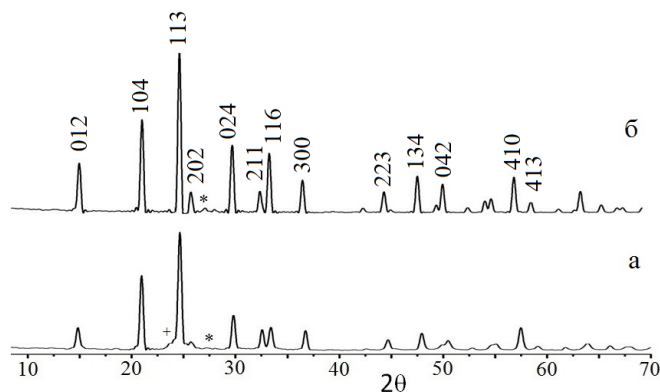
К полученному устойчивому раствору (концентрацией 0,39 моль/л по Ti) добавляли в соответствии со стехиометрией водные растворы  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  и  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , растворенный в разбавленной  $\text{HNO}_3$ . Коллективный прозрачный раствор упаривали при 60–70 °С в течение 4 ч до образования вязкого сиропобразного раствора, который при температуре 300 °С в результате разложения нитратов и оксалатов превращался в рентгеноаморфный (по данным РФА) прекурсор. Последующее твердофазное взаимодействие при температуре 750 °С протекало с образованием целевого продукта LATP в течение 1 ч за одну стадию. Технологическая схема синтеза твердого электролита LATP с использованием гидроксида Ti, полученного из титанита, представлена на рис. 1.



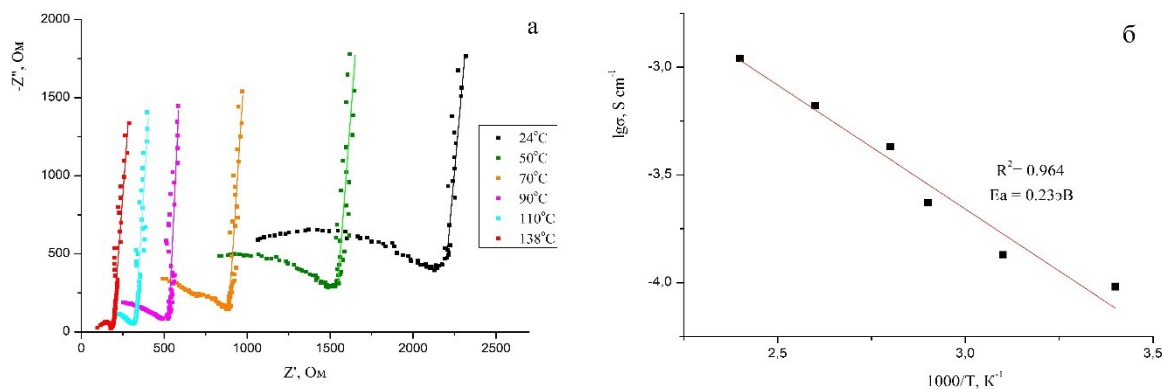
**Рис. 1.** Схема получения твердого электролита LATP с использованием гидроксида Ti, полученного из титанита

По данным РФА (рис. 2) после спекания порошка при 750 °С в течение 1 ч в образцах присутствуют примесные фазы фосфатов  $\text{LiTiOPO}_4$  (ICDD 00-044-0083) и  $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$  (ICDD 04-009-6534). При повышении температуры до 900 °С образуется хорошо окристаллизованный LATP (ICDD 00-066-0868), примесь  $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$  исчезает, а количество  $\text{LiTiOPO}_4$  уменьшается. Можно предположить, что во время термической обработки происходит взаимодействие вторичных фаз, что приводит к образованию LATP.  $\text{LiTiOPO}_4$  (около 5–10 мас. %) не способствует повышению объемной проводимости, но, благодаря своим микроструктурным характеристикам и расположению между зернами, помогает повысить как проводимость границ зерен, так и общую проводимость [10].

На рисунке 3, *а* представлены спектры электрохимического импеданса LATP, измеренные при различной температуре в интервале частот  $10^3$ – $2 \cdot 10^6$  Гц. Спектр импеданса LATP на комплексной плоскости  $Z'' = f(Z')$  представлял собой единичную полуокружность и луч, соответствующий измерениям импеданса на низких частотах. Как видно из графика, с увеличением температуры происходит постепенное уменьшение сопротивления и смещение годографов к началу координат. Величину общего сопротивления ( $R_{\text{total}}$ ) твердого электролита LATP рассчитывали экстраполяцией правой части полуокружности на ось активных сопротивлений ( $Z'$ ). Общая удельная проводимость  $\sigma_{\text{total}}$ , рассчитанная по формуле (1), составляет  $1,1 \cdot 10^{-4}$  См/см при комнатной температуре и увеличивается с повышением температуры до  $1,1 \cdot 10^{-3}$  См/см.



**Рис. 2.** Дифрактограмма LATP, синтезированного с использованием гидроксида Ti, полученного из титанита, после спекания при 750 °C (*а*) и 900 °C (*б*). \* —  $\text{LiTiOPO}_4$ ; + —  $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$



**Рис. 3.** Годографы импеданса LATP, измеренные при различной температуре (*а*), и температурная зависимость ионной проводимости LATP в интервале 25–140 °C (*б*)

Энергия активации ионной проводимости LATP была рассчитана по уравнению Аррениуса. Из рис. 3, *б* видно, что температурная зависимость в интервале 25–140 °C представляет собой прямую линию с величиной достоверной аппроксимации  $R^2 \geq 0,96$ . Линейная зависимость  $\lg \sigma$  от  $1000/T$  указывает на термическую активацию проводимости (повышение температуры увеличивает тепловую энергию переноса ионов  $\text{Li}^+$ ) и на отсутствие изменений в механизме проводимости в указанном диапазоне температур. Низкие значения энергии активации позволяют ионам  $\text{Li}^+$  свободно перемещаться по границам зерен и кристаллической решетке, что приводит к высокой ионной проводимости. Энергия активации ионной проводимости LATP, рассчитанная по наклону линейного графика, составила 0,23 эВ, что согласуется с литературными данными [11].

## Заключение

Показано, что гидроксид титана  $\text{TiO}(\text{OH})_2$ , полученный в результате переработки титанита  $\text{CaTiSiO}_5$ , можно успешно использовать для синтеза литийпроводящего твердого электролита состава  $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ . Установлено, что синтез LATP из оксалатного прекурсора обеспечивает образование целевого продукта при 750 °С. Ионная проводимость LATP составила  $1,1 \cdot 10^{-4}$  См/см при комнатной температуре, а энергия активации составила 0,23 эВ. Планируется провести аналогичные исследования для других титаносодержащих минералов, в частности перовскита.

## Список источников

1. Wu P., Zhou W., Su X., Li J., M. Su, Zhou X., Sheldon B. W., Lu W. Recent Advances in Conduction Mechanisms, Synthesis Methods, and Improvement Strategies for  $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$  Solid Electrolyte for All-Solid-State Lithium Batteries // *Adv. Energy Mater.* 2023. Vol. 13. 2203440.
2. Куншина Г. Б., Ефремов В. В., Локшин Э. П. Микроструктура и ионная проводимость титанофосфата лития-алюминия // *Электрохимия*. 2013. Т. 49, № 7. С. 808–814.
3. Куншина Г. Б., Бочарова И. В., Кузнецов В. Я. Синтез твердого электролита  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$  с использованием продукта переработки бадделеита // 2-я Международная научно-практич. конф. «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение»: Сб. тезисов. Москва, 23–25 ноября 2022 г. С. 372–374.
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. Liu J., Liu T., Pu Y., Guan M., Tang Z., Ding F., Xu Z. and Li Y. Facile synthesis of NASICON-type  $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$  solid electrolyte and its application for enhanced cyclic performance in lithium ion batteries through the introduction of an artificial  $\text{Li}_3\text{PO}_4$  SEI layer // *RSC Adv.* 2017. Vol. 7. 46545.
6. Maslova M., Mudruk N., Ivanenko V., Gerasimova L. Highly efficient synthesis of titanium phosphate precursor for electroactive materials // *Ceram. Int.* 2022. Vol. 48. P. 2257–2272.
7. Герасимова Л. Г., Щукина Е. С., Маслова М. В. Технология сфенового концентрата с получением титановых солей // *Химические технологии*. 2008. № 4. С. 25–29.
8. Герасимова Л. Г., Щукина Е. С. Отходы обогащения апатитонепелиновых руд — сырье для производства строительных материалов // *Лакокрасочная промышленность*. 2008. № 4. С. 22–25.
9. Куншина Г. Б., Бочарова И. В. Синтез твердого электролита  $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$  из оксалатного прекурсора // *Журн. неорганич. химии*. 2025. Т. 70, № 6. С. 776–783.
10. Hupfer T., Bucharsky E. C., Schell K. G., Hoffmann M. J. Influence of the secondary phase  $\text{LiTiOPO}_4$  on the properties of  $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$  ( $x = 0; 0.3$ ) // *Solid State Ionics*. 2017. Vol. 302. P. 49–53.
11. Wu X. M., Liu J. L., Li R. X., Chen S., Ma M. Y. Preparation and characterization of  $\text{LiMn}_2\text{O}_4/\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3/\text{LiMn}_2\text{O}_4$  thin-film battery by spray technique // *Russ. J. Electrochem.* 2011. Vol. 47. P. 917–922.

## References

1. Wu P., Zhou W., Su X., Li J., M. Su, Zhou X., Sheldon B. W., Lu W. Recent Advances in Conduction Mechanisms, Synthesis Methods, and Improvement Strategies for  $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$  Solid Electrolyte for All-Solid-State Lithium Batteries. *Adv. Energy Mater.*, 2023, Vol. 13, 2203440.
2. Kunshina G. B., Efremov V. V., Lokshin E. P. Microstructure and Ionic Conductivity of Lithium–Aluminum Titanophosphate. *Russ. J. Electrochem.*, 2013, Vol. 49, No. 7, pp. 725–731.
3. Kunshina G. B., Bocharova I. V., Kuznetsov V. Ya. Sintez tverdogo elektrolita  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$  s ispol'zovaniem produkta pererabotki baddeleita [Synthesis of  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$  solid electrolyte using a baddeleyite processing product]. 2-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakt. konf. "Redkie metally i materialy na ih osnove: tekhnologii, svoystva i primeneniye": Sb. tezisov. Moskva, 23–25 noyabrya 2022 g. [2nd International Scientific and Practical Conference "Rare Metals and Materials based on them: technologies, properties and applications": Coll. abstracts]. Moscow, 2022, pp. 372–374. (In Russ.).
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 neдр* [Exploration and protection of mineral resources], 2024, No. 2, pp. 81–88. (In Russ.).

5. Liu J., Liu T., Pu Y., Guan M., Tang Z., Ding F., Xu Z. and Li Y. Facile synthesis of NASICON-type  $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$  solid electrolyte and its application for enhanced cyclic performance in lithium ion batteries through the introduction of an artificial  $\text{Li}_3\text{PO}_4$  SEI layer. *RSC Adv.*, 2017, Vol. 7, 46545.
6. Maslova M., Mudruk N., Ivanenko V., Gerasimova L. Highly efficient synthesis of titanium phosphate precursor for electroactive materials. *Ceram. Int.*, 2022, Vol. 48, pp. 2257–2272.
7. Gerasimova L. G., Shchukina E. S., Maslova M. V. Tehnologiya sfenovogo koncentrata s polucheniem titanovykh soley [Technology of sphene concentrate for the production of titanium salts]. *Himicheskie tehnologii* [Chemical technologies], 2008, No. 4, pp. 25–29. (In Russ.).
8. Gerasimova L. G., Shchukina E. S. Othody obogashcheniya apatitonefelinovykh rud — syr'yo dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov [Waste from the processing of apatitonepheline ores is a raw material for the production of building materials]. *Lakokrasochnaya promyshlennost'* [Paint and varnish industry], 2008, No. 4, pp. 22–25. (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, no. 6, pp. 776–783.
10. Hupfer T., Bucharsky E. C., Schell K. G., Hoffmann M. J. Influence of the secondary phase  $\text{LiTiOPO}_4$  on the properties of  $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$  ( $x = 0; 0.3$ ). *Solid State Ionics*, 2017, Vol. 302, pp. 49–53.
11. Wu X. M., Liu J. L., Li R. X., Chen S., Ma M. Y. Preparation and characterization of  $\text{LiMn}_2\text{O}_4/\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3/\text{LiMn}_2\text{O}_4$  thin-film battery by spray technique. *Russ. J. Electrochem.*, 2011, Vol. 47, pp. 917–922.

#### **Информация об авторах**

**Г. Б. Куншина** — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;  
**И. В. Бочарова** — младший научный сотрудник;  
**Е. С. Щукина** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;  
**Л. Г. Герасимова** — доктор технических наук, главный научный сотрудник.

#### **Information about the authors**

**G. B. Kunshina** — PhD (Engineering), Leading Researcher;  
**I. V. Bocharova** — Research Assistant;  
**E. S. Shchukina** — PhD (Engineering), Senior Researcher;  
**L. G. Gerasimova** — DSc (Engineering), Principal Researcher.

Статья поступила в редакцию 20.05.2025; одобрена после рецензирования 11.06.2025; принята к публикации 25.06.2025.  
The article was submitted 20.05.2025; approved after reviewing 11.06.2025; accepted for publication 25.06.2025.