

Электрохимическая энергетика. 2026. Т. 26, № 2. С. 91–97

Electrochemical Energetics, 2026, vol. 26, no. 2, pp. 91–97

<https://energetica.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1608-4039-2026-26-2-91-97>, EDN: ХНРВНА

Научная статья

УДК 544.63

ЭЛЕКТРОДНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ФОСФАТА ВАНАДИЯ(III)-ЛИТИЯ И ПРОДУКТА ПИРОЛИЗА САЖИ И КРАХМАЛА

М. А. Попова[✉], А. В. Ушаков

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Попова Мария Андреевна, аспирант, masha961412@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-5173-2440>

Ушаков Арсений Владимирович, кандидат химических наук, директор Института химии, arsenivushakov@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0495-7750>

Аннотация. Проведено сравнение электродных композитов на основе $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ и углерода, синтезированных с использованием сажи или крахмала в качестве углеродных источников, по начальным характеристикам в режиме гальваностатического циклирования и по структурным особенностям. Электродный материал, полученный с применением крахмала, демонстрирует более высокую удельную емкость, но ее меньшую стабильность при циклировании, при этом характеризуется меньшим объемом элементарной ячейки и большим размером кристаллитов.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, ЛИА, перхлорат лития, LiClO_4 , LVP, углеродная добавка, рентгенофазовый анализ, механохимическая активация

Для цитирования: Попова М. А., Ушаков А. В. Электродные композиты на основе фосфата ванадия(III)-лития и продукта пиролиза сажи и крахмала // *Электрохимическая энергетика*. 2026. Т. 26, № 2. С. 91–97. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2026-26-2-91-97>, EDN: ХНРВНА

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

Article

Electrode composites based on lithium-vanadium(III) phosphate and pyrolysis product of carbon black and starch

М. А. Popova[✉], A. V. Ushakov

Saratov State University

83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Mariya A. Popova, masha961412@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-5173-2440>

Arseni V. Ushakov, arsenivushakov@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0495-7750>

Abstract. In this paper, we compare electrode composites based on $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ and carbon according to their initial characteristics in the galvanostatic cycling mode and structural features. The composites were synthesized using carbon black or starch as carbon sources. The electrode material obtained using starch demonstrates a higher specific capacity, the stability of which is lower during cycling, while characterized by a smaller unit cell volume and a larger crystallite size.

Keywords: lithium-ion battery, LIB, lithium perchlorate, LiClO_4 , LVP, carbon additive, X-ray phase analysis, mechanochemical activation

For citation: Popova M. A., Ushakov A. V. Electrode composites based on lithium-vanadium(III) phosphate and pyrolysis product of carbon black and starch. *Electrochemical Energetics*, 2026, vol. 26, no. 2, pp. 91–97 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2026-26-2-91-97>, EDN: ХНРВНА

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

ВВЕДЕНИЕ

Неограниченное потребление ископаемых видов топлива является одной из ключевых причин обострения экологического и энергетического кризиса в мире. Переход к возобновляемым источникам энергии требует эффективных систем ее хранения, и это стимулирует развитие химических источников тока. Среди них особое место занимают литий-ионные аккумуляторы (ЛИА), которые зарекомендовали себя благодаря высокой плотности энергии, стабильности при циклировании и низкому саморазряду [1].

В настоящее время ЛИА широко применяются в широком спектре электронных устройств: от смартфонов и планшетов до электромобилей и накопителей энергии в большой энергетике [2]. Производительность литий-ионного аккумулятора, в частности, определяется свойствами электродных материалов. Катодный материал на основе фосфата ванадия-лития $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ (LVP) привлекает внимание благодаря хорошей подвижности ионов лития и высокой теоретической емкости, достигающей 197 мА·ч/г. Однако широкое практическое применение LVP сдерживается его низкой собственной электронной проводимостью, а также склонностью к деградации при работе в области высоких потенциалов (свыше 4.6 В относительно лития) [3, 4].

Ранее в нашей научной группе рассматривали получение электродных материалов на основе LVP с применением гомогенизации системы прекурсоров, предшествующей высокотемпературной стадии (350° и 800°С) [5, 6] с получением материала с высокой работоспособностью при токах выше 300С, и приводили данные испытаний макетов на основе электрохимической системы (–) LTO | 1 М раствор LiClO_4 в смеси ПК+ДМЭ | LVP (+) (LTO – пентатитанат лития, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$; ПК и ДМЭ – пропиленкарбонат и диметоксиэтан соответственно) [3, 4]. Макет характеризуется возможностью заряда и разряда токами до 20С (в этом режиме реализуется удельная емкость LVP 37 мА·ч·г⁻¹). Вместе с этим отмечали сни-

жение уровня удельной емкости LVP в системе с LTO и накопление пероксидных соединений на LVP-электроде, находящимся в электролите, содержащем диметоксиэтан.

Существует множество подходов и условий синтеза $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$, которые напрямую влияют на микроструктуру, дисперсность и фазовую чистоту конечного продукта. Эти параметры, в свою очередь, оказывают определяющее влияние на свойства функционального материала. Ключевым подходом к преодолению низкой электронной проводимости LVP является модификация материала путем введения углеродных добавок [7]. Углерод, вводимый при синтезе материала, выполняет несколько функций. Во-первых, он является проводящей добавкой, которая облегчает перенос электронов в процессе заряда-разряда. Во-вторых, наличие углерода в процессе синтеза препятствует агломерации и росту зерен LVP, способствуя формированию более мелких частиц. В-третьих, прекурсоры углерода проявляют восстановительные свойства, что позволяет их использовать для восстановления V_2O_5 как ванадийсодержащего прекурсора. На эффективность модификации существенно влияют выбор углеродного источника и его количество. В качестве прекурсоров углерода используются различные органические соединения. Эффективны при введении в состав композитного электрода углеродные нанотрубки [8]. Исследования показывают, что природа углеродного источника или способ его введения определяют распределение углерода в композите, что напрямую сказывается на электрохимических характеристиках.

Предлагаем рассмотреть влияние двух источников углерода на электрохимические свойства синтезируемого $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ как катодного материала ЛИА.

1. МЕТОДИКА СИНТЕЗА МАТЕРИАЛА $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$

В данной работе использовали следующие реактивы: карбонат лития Li_2CO_3 (х.ч., ЗАО «Завод редких металлов», Россия), ок-

сид ванадия V_2O_5 (ч.д.а., ООО «Химреактивснаб», Россия), дигидрофосфат аммония $NH_4H_2PO_4$ (ч., «ЛенРеактив», Санкт-Петербург), ацетиленовая сажа (Super C65), поливинилиденфторид (Solef 5130/1001), крахмал растворимый (ч.д.а., Химприбор, Санкт-Петербург), N-метилпирролидон (х.ч., ГК «РусХим»), 0.67M раствор хлората(VII) лития $LiClO_4$ в смеси пропиленкарбоната и диметоксиэтана (с объемным соотношением 7:3) (ЛИТ 560130.001 ТУ, АО «Литий-элемент»; содержание воды не более 20 ppm), аргон высокой чистоты (99.998%, ООО «ПРАКСАЙР ВОЛГОГРАД»), ацетон (х.ч., АО «ЭКОС-1»).

Получение катодного материала $Li_3V_2(PO_4)_3$ осуществлялось методом высокотемпературного твердофазного синтеза с предварительной механохимической активацией исходных компонентов. В качестве прекурсоров использовались: карбонат лития (Li_2CO_3), оксид ванадия (V_2O_5), дигидрофосфат аммония ($NH_4H_2PO_4$) и источники углерода (крахмал или сажа для получения образцов с идентификаторами LVP/starch или LVP/C соответственно). Крахмал или сажа вводились согласно расчетному содержанию углерода в конечном композите 1 мас.%. Смесь подвергалась механохимической активации в мельнице АГО-2 (ООО «Новиц», г. Новосибирск) в среде ацетона. Применение ацетона на данном этапе позволяет достичь равномерного распределения компонентов, а механическая активация способствует увеличению реакционной способности частиц твердых фаз. После активации полученную суспензию высушивали, воздушно-сухую смесь переносили в фарфоровую лодочку и помещали в трубчатую печь. Термическая обработка проводилась в атмосфере аргона. Синтез осуществляли в два этапа: при температуре $350^\circ C$ в течение 4 часов для термического разложения прекурсоров и удаления газообразных продуктов, таких как аммиак, вода, диоксид углерода; при температуре $800^\circ C$ в течение 8 часов для формирования углеродной фазы и кристаллической фазы $Li_3V_2(PO_4)_3$.

1.1. Рентгенофазовый анализ

Регистрацию дифрактограмм осуществляли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-8Т (АО «ИЦ «Буревестник», Санкт-Петербург, Россия). Первичную обработку полученных дифрактограмм проводили с использованием специализированного программного обеспечения, разработанного АО «ИЦ «Буревестник». Идентификацию фаз осуществляли путем сравнения экспериментальных данных с эталонными дифрактограммами из базы данных PDF-2 (версия 2.2102, 2021 г.) Международного центра дифракционных данных (ICDD). Параметры элементарной ячейки, характеризующие моноклинную фазу $Li_3V_2(PO_4)_3$ с пространственной группой $P2_1/n$, а также микроструктурные параметры фазы уточнялись полнопрофильным анализом с применением программы FullProof. В качестве начальных параметров для фазы $Li_3V_2(PO_4)_3$ применялись параметры элементарной ячейки в соответствии с данными [9], а для параметров ширины пиков – параметры стандартного образца корунда.

1.2. Электрохимическое тестирование

Для приготовления рабочих электродов синтезированный материал $Li_3V_2(PO_4)_3$ смешивали с проводящей добавкой (сажа) и связующим компонентом – поливинилиденфторидом (PVDF) – в массовом соотношении 80:10:10. Связующее предварительно растворяли в N-метилпирролидоне (NMP) с получением 3%-ного раствора. Полученную суспензию гомогенизировали и наносили на алюминиевые подложки. Готовые электроды подвергали сушке в вакуумном шкафу при температуре $110^\circ C$ с последующей прокаткой на вальцах. Уровень нанесения составлял 1.9–3.4 мг LVP на 1 см^2 подложки.

Электрохимические характеристики полученного катодного материала исследовали в трехэлектродной ячейке. Сборку ячеек осуществляли в перчаточном боксе с атмосферой аргона, дополнительно осу-

шенного с применением оксида фосфора(V). Электродом сравнения служил литиевый электрод, запрессованный в стеклянную трубку, а вспомогательным электродом – титановая пластина с намотанным на нее металлическим литием. В качестве электролита использовали упомянутый выше раствор LiClO_4 .

Гальваностатическое циклирование проводили с использованием многоканального потенциостата-гальваностата Р-20Х8 в диапазоне потенциалов 3.0–4.7 В с суховоздушным термостатированием при 30°C. Циклирование осуществляли при различных скоростях (нормированных токах): первый цикл – при 0.1С, второй – при 0.2С, третий – при 0.5С, четвертый и последующие циклы – при 1С.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно данным рентгенофазового анализа, каждый продукт представляет собой фазово-чистый $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$, модифицирующие добавки отдельных кристаллических фаз не образуют. Образцы обладают разной степенью кристалличности, о чем свидетельствуют различие в интенсивностях пиков при одинаковом режиме регистрации и разная ширина пиков. Меньшей кристалличностью характеризуется образец

LVP/C. В таблице и на рис. 1 представлены результаты полнопрофильного анализа дифрактограмм образцов. Параметры элементарной ячейки $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ для образца LVP/C больше, чем для LVP/starch на: 0.06% (параметр a), 0.12% (параметр b), 0.04% (параметр c), что при статистически одинаковом угле β соответствует различию в объемах элементарной ячейки на 0.23%. Увеличенная ширина пиков для LVP/C соответствует уменьшенному размеру областей когерентного рассеяния (60 нм против 300 нм), который пропорционален размеру кристаллитов. При этом общее уширение пиков для обоих образцов в сравнении с эталонным корундом обусловлено также микронапряжениями, количественная мера которых одинакова для обоих образцов.

На рис. 2 представлены гальваностатические кривые заряда-разряда для образцов LVP/C и LVP/starch. Форма кривых заряда-разряда для обоих образцов имеет типичный для фосфата ванадия(III)-лития вид, характеризующийся наличием серии плато, отвечающих за фазовые переходы в процессе (де)интеркаляции ионов Li^+ . В области высоких потенциалов в случае заряда наименьшим током (рис. 2, а и 2, в) наблюдается различие между образцами: для образца LVP/C наблюдаем более протяженную горизонтальную площадку. Вместе с тем форма

Параметры кристаллической решётки $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ и микроструктурные параметры
Table. Crystal lattice parameters of $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ and microstructural parameters

| Параметр / Parameter | Начальные параметры в соответствии с [9] / Initial parameters according to [9] | Значение параметра для образца / The parameter value for the sample | |
|--|--|---|----------------------|
| | | LVP/starch | LVP/C |
| a , Å | 8.6056 | 8.6066 ± 0.0003 | 8.6121 ± 0.0005 |
| b , Å | 8.5917 | 8.5925 ± 0.0004 | 8.6031 ± 0.0005 |
| c , Å | 12.037 | 12.0374 ± 0.0004 | 12.0422 ± 0.0006 |
| β , ° | 90.609 | 90.585 ± 0.002 | 90.588 ± 0.003 |
| Размер областей когерентного рассеяния, нм / The size of coherent scattering regions, nm | – | 300 | 60 |
| Величина микронапряжения ($\epsilon \cdot 10^4$) / Strain ($\epsilon \cdot 10^4$) | – | 20 | 20 |

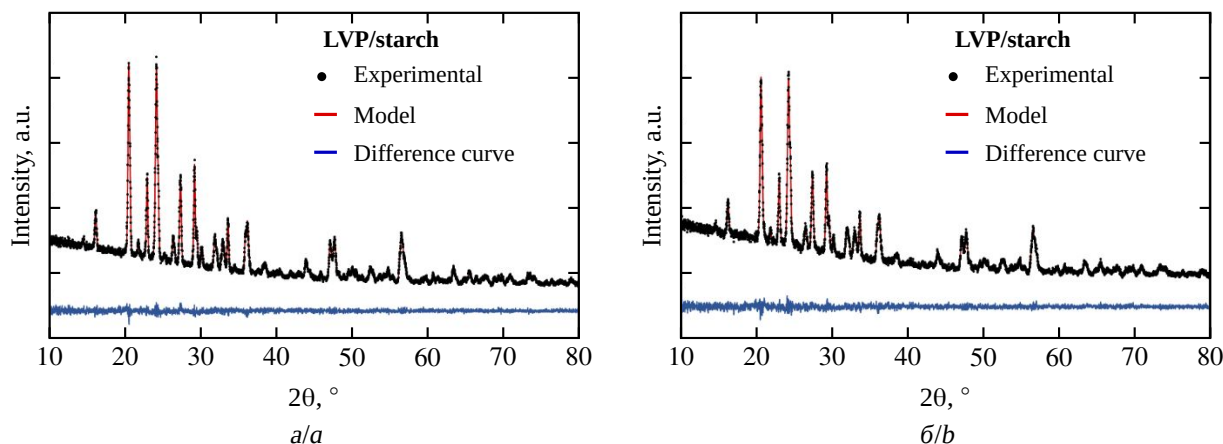


Рис. 1. Иллюстрация полнопрофильного анализа дифрактограмм образцов LVP/starch (а) и LVP/C (б) (цвет онлайн)

Fig. 1. The illustration of full-profile analysis of diffraction patterns of LVP/starch (a) and LVP/C (b) samples (color online)

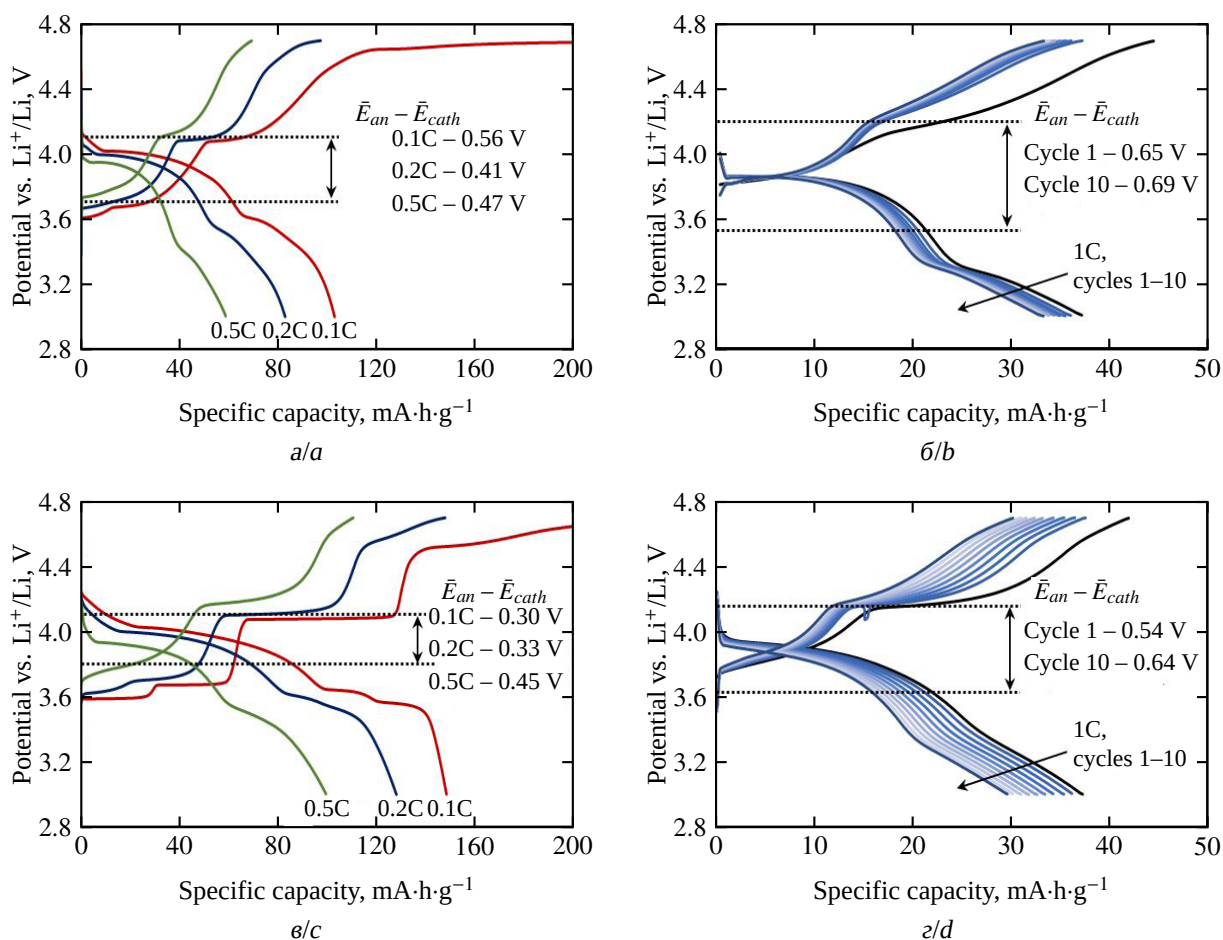


Рис. 2. Кривые гальваностатического заряда и разряда материалов LVP/C (а, б) и LVP/starch (в, г) при нормированных токах 0.1C – 0.5C (а, в) и 1C (б, г) при температуре 30°C. Приводятся значения разности средних потенциалов заряда (E_{an}) и разряда (E_{cath}) (цвет онлайн)

Fig. 2. Galvanostatic charge and discharge curves of LVP/C (a, b) and LVP/starch (c, d) materials at normalized currents of 0.1C – 0.5C (a, c) and 1C (b, d) at the temperature of 30°C. The values of the difference between the average charge (E_{an}) and discharge potentials (E_{cath}) are given (color online)

разрядных кривых для образцов схожа и характеризуется наличием участков с задержкой потенциала около 3.8–4.2 и 3.5–3.6 В. Следовательно, заряд при высоком потенциале для обоих образцов обязательно сопровождался последней ступенью извлечения лития из LVP [3, 4], но для образца LVP/C более существенна доля посторонних анодных процессов, приводящая к сниженной кулоновской эффективности зарядно-разрядного цикла.

Начальная удельная емкость разряда для образца LVP/C (см. рис. 2, а) составляет 100 мА·ч/г, для образца LVP/starch (см. рис. 2, в) – 140 мА·ч/г. Поведение для образца LVP/starch несколько уступает ранее опубликованным результатам [3–6, 8] для образцов, также полученных с применением крахмала, из-за более упрощенной методики изготовления электрода (в сравнении с [3–6]) или из-за применения сажи в качестве дополнительной электропроводящей добавки, а не углеродных нанотрубок (в сравнении с [8]). Образец LVP/starch демонстрирует более высокие значения удельной емкости по сравнению с LVP/C и при других нормированных токах. Также для образца LVP/starch наблюдаем уменьшенную разницу между средними потенциалами за-

ряда и разряда, что соответствует большей отдаче по напряжению и по энергии потенциального аккумулятора с ним в качестве катодного материала. (Средний потенциал оценивался как среднее для всех значений потенциала на полцикле, зарегистрированных через равные промежутки времени; взаимосвязь характеристик в соответствии с [10].)

Относительная стабильность емкости в режиме 1С для образца LVP/starch ниже, хотя на 10-м цикле удельная емкость все еще превосходит значение этой характеристики для образца LVP/C примерно в 2 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Среди электродных композитов на основе $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ (LVP) и углерода, полученных с использованием сажи (LVP/C) или крахмала (LVP/starch) в качестве углеродных источников, по начальной удельной емкости образец LVP/starch существенно лучше образца LVP/C, при этом уступает последнему по относительной стабильности емкости при циклировании в режиме 1С. Использование крахмала приводит к получению более окристаллизованного активного $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кедринский И. А., Яковлев В. Г. Li-ионные аккумуляторы. Красноярск : Платина, 2002. 268 с.
2. Choi D., Shamim N., Crawford A., Huang Q., Vartanian C. K., Viswanathan V. V., Paiss M. D., Alam M. J. E., Reed D. M., Sprenkle V. L. Li-ion battery technology for grid application // *J. Power Sources*. 2021. Vol. 5. P. 738–759. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230419>
3. Ushakov A. V., Makhov S. V., Gridina N. A., Ivanishchev A. V., Gamayunova I. M. Rechargeable lithium-ion system based on lithium-vanadium(III) phosphate and lithium titanate and the peculiarity of it functioning // *Monatshefte für Chemie – Chemical Monthly*. 2019. Vol. 150. P. 499–509. <https://doi.org/10.1007/s00706-019-2374-4>
4. Махов С. В., Ушаков А. В., Иванищев А. В., Гридина Н. А., Чуриков А. В., Гамаюнова И. М., Волынский В. В., Ключев В. В. Особенности совместного функционирования пентатитаната лития и фосфата ванадия(III) – лития в литий-аккумулирующей системе // *Электрохимическая энергетика*. 2017. Т. 17, № 2. С. 99–119. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2017-17-2-99-119>
5. 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 $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ -based electrode material // *Electrochimica Acta*. 2017. Vol. 230. P. 479–491. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.02.009>
6. Ivanishchev A. V., Churikov A. V., Ushakov A. V. Lithium transport processes in electrodes on the basis of $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ by constant current chronopotentiometry, cyclic voltammetry and pulse chronoamperometry // *Electrochimica Acta*. 2014. Vol. 122. P. 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.12.131>
7. Huang T., Guo X., Wang F., Zhang L., Zhou X., Xu Y., Wu C., Zeng W. Carbon coated $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ derived from phytic acid with ultra-high

rate performance for rechargeable Li ion batteries // *Surfaces and Interfaces*. 2024. Vol. 52. Art. 104900. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.104900>

8. Ушаков А. В., Рыбаков К. С., Хрыкина А. В. Композитные электроды на основе $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ и углеродных нанотрубок: влияние состава, толщины и морфологии поверхности на электрохимические свойства // *Электрохимическая энергетика*. 2024. Т. 24, № 3.

C. 133–149. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2024-24-3-133-149>

9. Yin S.-C., Grondy X., Strobel P., Anne M., Nazar L. F. Electrochemical Property: Structure Relationships in Monoclinic $\text{Li}_{3-y}\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ // *Journal of the American Chemical Society*. 2003. Vol. 125, № 34. P. 10402–10411. <https://doi.org/10.1021/ja034565h>

10. Багоцкий В. С., Скундин А. М. Химические источники тока. М. : Энергоиздат, 1981. 360 с.

REFERENCES

1. Kedrinsky I. A., Yakovlev V. G. *Li-ionnyye akkumulyatory* [Li-ion batteries]. Krasnoyarsk, Platina, 2002. 268 p. (in Russian).

2. Choi D., Shamim N., Crawford A., Huang Q., Vartanian C. K., Viswanathan V. V., Paiss M. D., Alam M. J. E., Reed D. M., Sprenkle V. L. Li-ion battery technology for grid application. *J. Power Sources*, 2021, vol. 5, pp. 738–759. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230419>

3. Ushakov A. V., Makhov S. V., Gridina N. A., Ivanishchev A. V., Gamayunova I. M. Rechargeable lithium-ion system based on lithium-vanadium(III) phosphate and lithium titanate and the peculiarity of it functioning. *Monatshefte für Chemie – Chemical Monthly*, 2019, vol. 150, pp. 499–509. <https://doi.org/10.1007/s00706-019-2374-4>

4. Makhov S. V., Ushakov A. V., Ivanishchev A. V., Gridina N. A., Churikov A. V., Gamayunova I. M., Volynskiy V. V., Klyuev V. V. Peculiarities of lithium pentatitanate and lithium-vanadium(III) phosphate joint operation in the lithium-accumulating system. *Electrochemical Energetics*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 99–119 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2017-17-2-99-119>

5. 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 $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ -based electrode material. *Electrochimica*

Acta, 2017, vol. 230, pp. 479–491. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.02.009>

6. Ivanishchev A. V., Churikov A. V., Ushakov A. V. Lithium transport processes in electrodes on the basis of $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ by constant current chronopotentiometry, cyclic voltammetry and pulse chronoamperometry. *Electrochimica Acta*, 2014, vol. 122, pp. 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.12.131>

7. Huang T., Guo X., Wang F., Zhang L., Zhou X., Xu Y., Wu C., Zeng W. Carbon coated $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ derived from phytic acid with ultra-high rate performance for rechargeable Li ion batteries. *Surfaces and Interfaces*, 2024, vol. 52, art. 104900. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.104900>

8. Ushakov A. V., Rybakov K. S., Khrykina A. V. Composite electrodes based on $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ and carbon nanotubes: The influence of composition, thickness and surface morphology on electrochemical properties. *Electrochemical Energetics*, 2024, vol. 24, no. 3, pp. 133–149 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2024-24-3-133-149>

9. Yin S.-C., Grondy X., Strobel P., Anne M., Nazar L. F. Electrochemical Property: Structure Relationships in Monoclinic $\text{Li}_{3-y}\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$. *Journal of the American Chemical Society*, 2003, vol. 125, no. 34, pp. 10402–10411. <https://doi.org/10.1021/ja034565h>

10. Bagotskiy V. S., Skundin A. M. *Khimicheskiye istochniki toka* [Chemical power sources]. Moscow, Energoizdat, 1981. 360 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 07.05.2026; одобрена после рецензирования 13.05.2026; принята к публикации 21.05.2026; опубликована 30.06.2026
The article was submitted 07.05.2026; approved after reviewing 13.05.2026; accepted for publication 21.05.2026; published 30.06.2026