

Научная статья

УДК 621.355

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-186-197

## СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНТЕЗИРОВАННОГО ИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕАКТИВОВ ОРТОРОМБИЧЕСКОГО ПЕНТОКСИДА ВАНАДИЯ

А.А. Леонов<sup>1</sup>, В.А. Дуюнова<sup>1</sup>, Н.В. Трофимов<sup>1</sup>, В.В. Кузнецов<sup>2</sup>, Д.И. Черкасов<sup>2</sup>,  
Д.А. Макаренков<sup>3</sup>, Н.М. Родионов<sup>3</sup>, И.Ю. Комендо<sup>3</sup>, А.Л. Михлин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», Москва, Россия; pochta@muctr.ru

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия; nrcki@nrcki.ru

**Аннотация.** Исследованы особенности синтезированного орторомбического пентоксида ванадия, полученного по многостадийной методике из технического сырья. Установлено, что полученный пентоксид ванадия характеризуется крупной агрегацией частиц различной морфологии, связанной с параметрами синтеза, в частности высоким значением рН на стадии осаждения прекурсора. Электрохимические исследования выявили две пары редокс-переходов:  $V(V) \rightarrow V(IV)$  и  $V(IV) \rightarrow V(III)$ , а также позволили определить рабочие границы рН-стабильности (рН = 5–9).

**Ключевые слова:** пентоксид ванадия, рентгеноструктурный анализ, просвечивающая электронная микроскопия, растровая электронная микроскопия, циклическая вольтамперометрия, редокс-переход

**Для цитирования:** Леонов А.А., Дуюнова В.А., Трофимов Н.В., Кузнецов В.В., Черкасов Д.И., Макаренков Д.А., Родионов Н.М., Комендо И.Ю., Михлин А.Л. Структурные особенности и электрохимические характеристики синтезированного из технических реактивов орторомбического пентоксида ванадия // Труды ВИАМ. 2026. № 5 (159). С. 186–197. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-186-197.

Scientific article

## STRUCTURAL FEATURES AND ELECTROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF ORTHORHOMBIC VANADIUM PENTOXIDE SYNTHESIZED FROM TECHNICAL REAGENTS

A.A. Leonov<sup>1</sup>, V.A. Duyunova<sup>1</sup>, N.V. Trofimov<sup>1</sup>, V.V. Kuznetsov<sup>2</sup>, D.I. Cherkasov<sup>2</sup>,  
D.A. Makarenkov<sup>3</sup>, N.M. Rodionov<sup>3</sup>, I.Yu. Komendo<sup>3</sup>, A.L. Mihlin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

<sup>2</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia; pochta@muctr.ru

<sup>3</sup>National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; nrcki@nrcki.ru

**Abstract.** The study investigates the features of the synthesized orthorhombic vanadium oxide obtained through a multistage procedure from technical raw materials. It was established that the

resulting vanadium oxide is characterized by strong particle aggregation with diverse morphologies, which is related to synthesis parameters. Particularly the high pH value during the precursor precipitation stage. Electrochemical studies revealed two pairs of redox transition:  $V(V) \rightarrow V(IV)$  and  $V(IV) \rightarrow V(III)$ , and also allowed the determination of the working pH stability range (pH = 5–9).

**Keywords:** vanadium pentoxide, X-ray diffraction analysis, transmission electron microscopy, scanning electron microscopy, cyclic voltammetry, redox transition

**For citation:** Leonov A.A., Duyunova V.A., Trofimov N.V., Kuznetsov V.V., Cherkasov D.I., Makarenkov D.A., Rodionov N.M., Komendo I.Yu., Mihlin A.L. Structural features and electrochemical characteristics of orthorhombic vanadium pentoxide synthesized from technical reagents. *Trudy VIAM*, 2026, no. 5 (159), pp. 186–197. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-186-197.

## Введение

Электрификация авиационной отрасли является одним из стратегических направлений соблюдения Декларации о сокращении вредных выбросов, утвержденной в 2008 г. Международной ассоциацией воздушного транспорта. Согласно данному документу, до 2050 г. планируется снизить общее количество  $CO_2$ , выделяемого гражданской авиацией, на 50 %. В обеспечение развития данной стратегии поставлены цели: 7 «Доступная энергия», 9 «Промышленность, инновации и инфраструктура» и 13 «Борьба с изменением климата», в совокупности достигающиеся использованием альтернативных источников энергии [1]. Мероприятия, необходимые для достижения поставленных целей, схематично приведены на рис. 1.

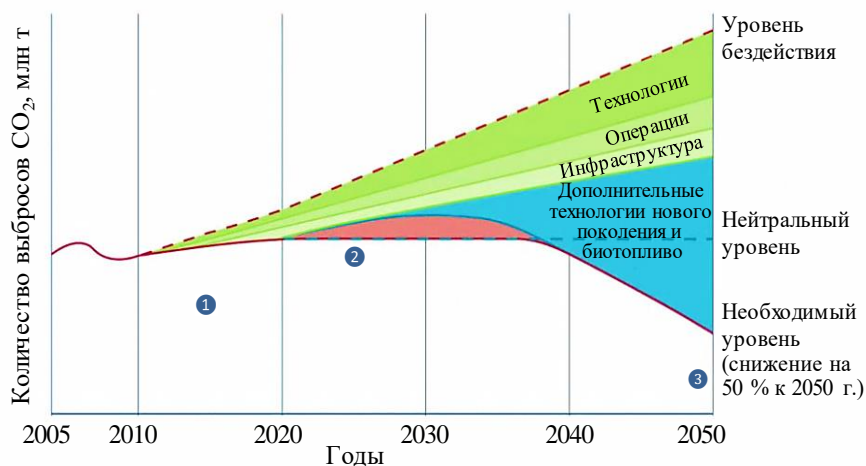


Рис. 1. Дорожная карта сокращения выбросов: 1–3 – этапы достижения поставленных целей [1]

Согласно представленной на рис. 1 диаграмме, первоначальным этапом, завершившимся в 2020 г., считается повышение топливной эффективности за счет обновления летного парка. Следующим шагом выступает регулирование с использованием рыночных мер (красная зона на рис. 1) в случае, если авиационная отрасль не обеспечивает сокращения выбросов с помощью эксплуатационных, технологических, инфраструктурных мер или использования биотоплива. Третьим этапом (начнется с 2030 г.) является использование передовых технологий нового поколения с упором на альтернативные виды топлива и технологии.

Во исполнение Указа Президента Российской Федерации от 4 ноября 2020 г. № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов» Правительство Российской Федерации

Распоряжением от 29 октября 2021 г. № 3052-р утвердило Стратегию социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г., в рамках которой одними из основных инструментов являются применение новых технологий и активная электрификация различных отраслей промышленности [2, 3].

Электрификация воздушного судна подразумевает как полноценную электрификацию, так и внедрение гибридных методов, основанных на совместном использовании традиционных двигателей и электрических установок. Традиционно в качестве основных устройств хранения энергии рассматриваются литий-ионные аккумуляторы, которые, несмотря на значительное превосходство по показателям энергоемкости перед аналогичными химическими источниками тока, имеют существенные недостатки: высокую стоимость, ограниченный ресурс, проблемы с безопасностью и сложности при работе в широком диапазоне температур [4–8].

Магний-ионные аккумуляторы благодаря теоретическим объемно-массовым показателям рассматриваются как одна из наиболее перспективных альтернативных электрохимических систем. Энергетические преимущества вытекают из мультивалентной природы магниевых ионов, которые обладают более высокой теоретической зарядной плотностью по сравнению с традиционными одновалентными ионами лития ( $3833$  и  $2062$   $\text{mA}\cdot\text{ч}/\text{cm}^3$  соответственно). Магний является самым легким мультизарядным ( $\text{Mg}^{2+}$ ) элементом (плотность составляет  $1,738$   $\text{г}/\text{cm}^3$ ). Для алюминия ( $\text{Al}^{3+}$ ) и цинка ( $\text{Zn}^{2+}$ ) этот показатель равен  $2,7$  и  $7,133$   $\text{г}/\text{cm}^3$  соответственно. Кроме того, по сравнению с литием (средний кларк в земной коре  $0,002$  % (по массе)) магний является более распространенным элементом ( $\sim 2,3$  % (по массе)), что делает его дешевым для использования в аккумуляторах. В отличие от лития, который является дорогим и ограниченно распространенным, магний можно добывать и использовать в больших объемах, что, соответственно, приведет к снижению стоимости конечного изделия [4, 9].

Конструктивно магний-ионный аккумулятор не отличается от аналогичных химических источников тока, основными «действующими» элементами являются анод, катод и электролит. Катод в электрохимической системе такого аккумулятора имеет основное значение для процессов зарядки и разрядки. Его основная функция заключается в осуществлении электронного и ионного переносов в ходе электрохимической реакции. В отличие от ионного переноса, осуществляемого через электролит, электронный перенос реализуется через внешние контакты и используется для работы на внешней нагрузке. Идеальный катодный материал должен обеспечивать интеркаляцию/деинтеркаляцию ионов магния и иметь необходимые циклические характеристики. Кинетика внедрения ионов магния существенно зависит от их подвижности в таких материалах. Как правило, ионная подвижность в основном определяется тремя структурными факторами: связью между участками материала, размером канала диффузии ионов, взаимодействием между внедренными молекулами и основной структурой материала [10–12].

В традиционных литий-ионных аккумуляторах применяются различные катодные материалы, такие как оксиды лития, шпинели или смешанные оксидно-фосфатные соединения, например кобальтат лития ( $\text{LiCoO}_2$ ) и твердые растворы на основе изоструктурного ему никелата лития, литий-марганцевая шпинель ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) и феррофосфат лития ( $\text{LiFePO}_4$ ). Высокий заряд  $\text{Mg}^{2+}$  приводит к сильному электростатическому взаимодействию с кристаллической решеткой этих материалов, затрудняя диффузию и вызывая структурную деградацию, в связи с чем их применение в магний-ионных аккумуляторах нецелесообразно [4].

Благодаря высокой теоретической емкости и структурным особенностям ванадия рассматривается как один из наиболее подходящих материалов для катодов. Он имеет несколько степеней окисления, что обеспечивает высокую способность аккумулировать электрическую энергию [13, 14]. Все соединения ванадия, имеющие ванадий-кислородные тетраэдры, обладают пластинчатой или туннельной кристаллической структурой (рис. 2), что благоприятствует кинетике диффузии ионов магния и стабильности структуры при внедрении/извлечении  $Mg^{2+}$ . Кроме того, свойство гибкого искажения структур, образованных атомами V и O, облегчает размещение интеркалированных ионов магния за счет способности изменять форму и конфигурацию под воздействием внешних факторов.

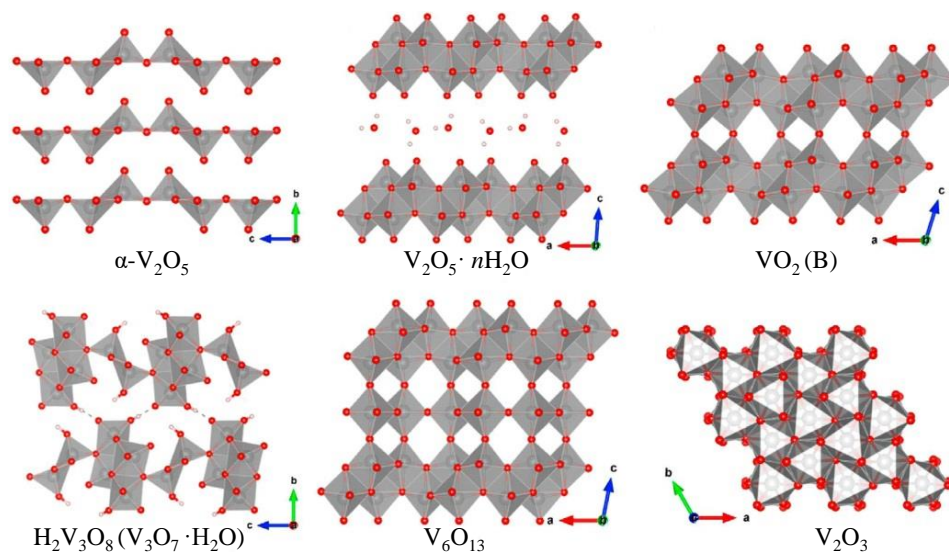


Рис. 2. Кристаллическое строение различных оксидов ванадия [13, 14]

Существование той или иной модификации и достижение необходимых разрядных показателей напрямую связаны с технологией синтеза, составом и морфологией получаемых частиц.

### Материалы и методы

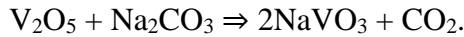
Материалом исследования являлся оксид ванадия ( $V_2O_5$ ). Полученный порошок исследовали с использованием металлографических методов – растровой и просвечивающей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа. Для определения электрохимических свойств полученных образцов оксида ванадия (V) навеску порошка массой ~10 мг диспергировали с 5%-ным спиртовым раствором иономера Nafion® в ультразвуковой бане. Полученную суспензию равномерно наносили на поверхность предварительно подготовленного стеклоглеродного электрода (площадью 4,5 см<sup>2</sup>), средняя толщина нанесенного слоя составляла ~10 мкм. Электроды сушили в лаборатории на воздухе в течение 1 сут.

Поляризационные измерения проводили в серии буферных растворов, использующих систему  $H_2PO_4^- / HPO_4^{2-}$  при pH = 5–7. Перед проведением измерений раствор деаэрировали аргоном (ос.ч.) в течение 30 мин. Во всех экспериментах использовали цифровой потенциостат. Потенциал рабочего электрода задавали относительно хлорсеребряного электрода сравнения. В качестве вспомогательного электрода использовали сетку из платинированного титана.

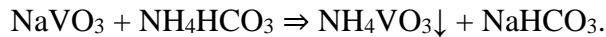
Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Результаты и обсуждение

Пентоксид ванадия получен по оригинальной методике, разработанной во ФГУП «ИРЕА» (в настоящее время – Курчатовский комплекс физико-химических технологий НИЦ «Курчатовский институт»). Навеску пентоксида ванадия квалификации «технический» растворяли в растворе карбоната натрия, нагретом до температуры 90–95 °С. В результате образовался раствор ванадата натрия:

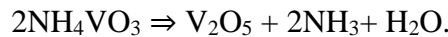


После охлаждения раствор фильтровали от нерастворимого шлама. Далее при перемешивании добавляли сухой гидрокарбонат аммония:



Полученный осадок метаванадата аммония отделяли от маточного раствора под вакуумом на воронке Бюхнера и промывали раствором гидрокарбоната аммония.

Разложение метаванадата аммония проводили в кварцевом тигле в камерной электрической печи при температуре 500 °С в течение 2 ч:



Примесную чистоту полученного материала оценивали с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой, результаты приведены на рис. 3. Красными точками обозначены пределы обнаружения соответствующих элементов. Полученный пентоксид ванадия по содержанию примесей соответствует квалификации ч.д.а.

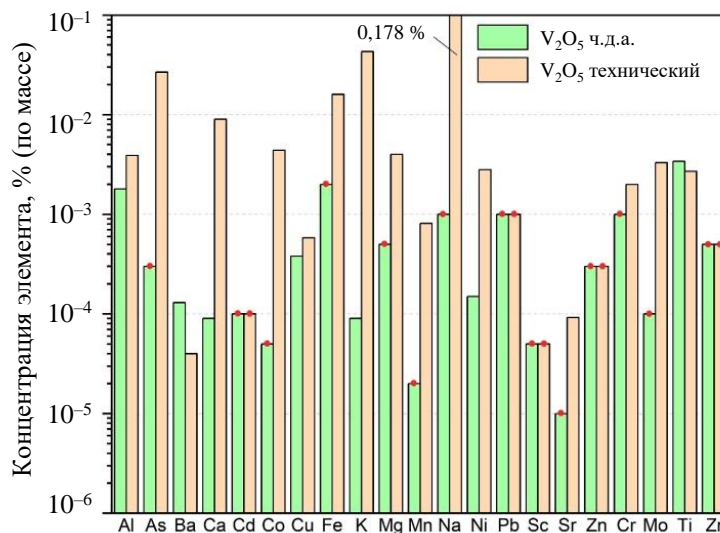


Рис. 3. Распределение примесей в пентоксиде ванадия до и после очистки по данным атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой

Важным направлением является исследование порошков оксида ванадия с использованием металлографических методов с целью получения информации о морфологии и структуре материала. Металлография позволяет проводить детальный анализ структурных особенностей, таких как зернообразование, фазовый состав, дефекты и текстуры.

Результаты растровой электронной микроскопии порошка пентоксида ванадия позволили выявить не только морфологические особенности, но и структурные параметры. На рис. 4 и 5 приведен общий вид порошка при различных увеличениях.

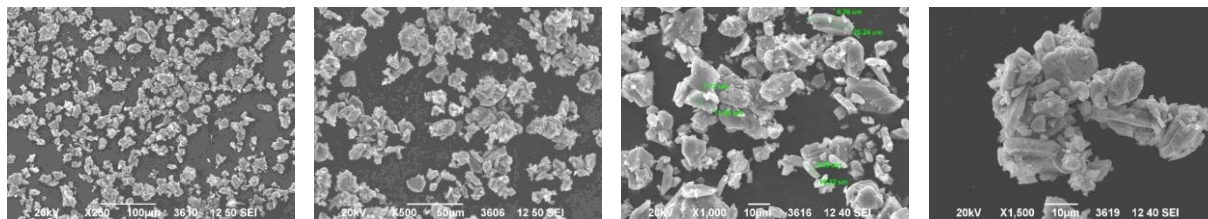


Рис. 4. Микроструктура пентоксида ванадия, полученная методом растровой электронной микроскопии

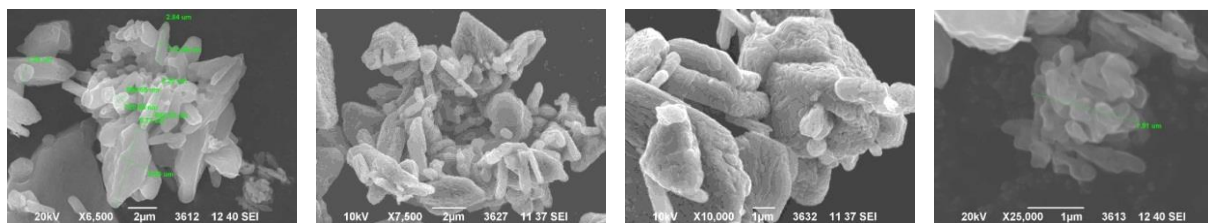


Рис. 5. Агломераты частиц пентоксида ванадия

Для частиц в данном состоянии характерно существенное различие в морфологии. Можно наблюдать как единичные частицы, так и скопления в виде слипшихся частиц – агломератов, что особенно заметно при больших увеличениях (рис. 5).

Агломерация – процесс образования крупных структур путем слипания мелких частиц, который может быть вызван различными факторами, такими как взаимодействие между поверхностями частиц, наличие примесей или добавок, термические воздействия. На поверхности частиц пентоксида ванадия могут накапливаться вещества, облегчающие их сцепление и образование агломератов вследствие физико-химических процессов, таких как адсорбция молекул воды или других веществ на поверхности частиц, либо воздействия электростатических сил, взаимодействия Ван-дер-Ваальса и других межмолекулярных сил.

Одной из возможных причин образования выявленных агрегированных кластеров является высокое значение рН (8,5–9,0) раствора прекурсора  $\text{NH}_4\text{VO}_3$ , используемого для получения пентоксида ванадия. В работе [15] показано влияние значения рН (в интервале 1–10) на морфологию и электрохимические характеристики. При рН = 1 пентоксид ванадия имел чешуйчатую морфологию, наноразмерные чешуйки случайным образом укладывались в более крупные вторичные чешуйки размером до 2 мкм. При рН = 4 выявлена палочковидная морфология с частицами различной ширины и длины. В случае активной кислотности, равной 6 и 10, в образцах наблюдали микрометровые агрегированные кластеры из частиц разного размера.

Разнообразие форм частиц (круглые, стержневидные и т. д.) и повышенная «слипаемость» могут оказывать существенное влияние на электрохимические характеристики, например уменьшать удельную плотность поверхности, повышать внутреннее сопротивление и ограничивать доступ ионов магния за счет образования контактных плохо проводящих слоев между соприкасающимися частицами, которые будут препятствовать электронному и ионному транспорту. Это критично в условиях двухвалентной природы ионов магния, которая и так является причиной не только

высоких энергетических показателей, но и пониженной кинетики процессов интеркаляции в катодные материалы [16–19].

Параметры и тип кристаллической решетки определяли с использованием рентгеноструктурного анализа. Полученная дифрактограмма представлена на рис. 6.

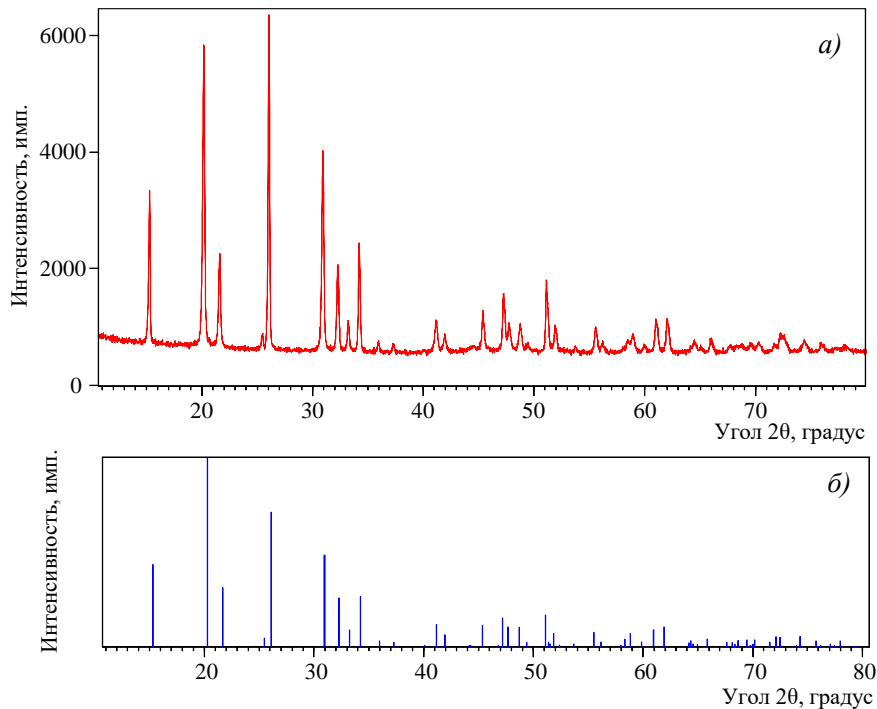


Рис. 6. Дифрактограмма синтезированного образца (а) и штрих-диаграмма (б) определенной фазы ( $V_2O_5$ )

Синтезированный порошок пентоксида ванадия имеет орторомбическую кристаллическую решетку с параметрами  $a = 3,5624 \text{ \AA}$ ,  $b = 11,5068 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,3748 \text{ \AA}$  и размером кристаллитов  $\sim 150 \text{ \AA}$ . Образующиеся агломераты частиц затрудняют проведение исследований методом просвечивающей электронной микроскопии. Так, кроме рефлексов, формирующих ряды, на дифракционной картине присутствуют дополнительные рефлексы, которые образуются в результате дифракции электронов на соседних и/или перекрывающихся кристаллах (рис. 7).

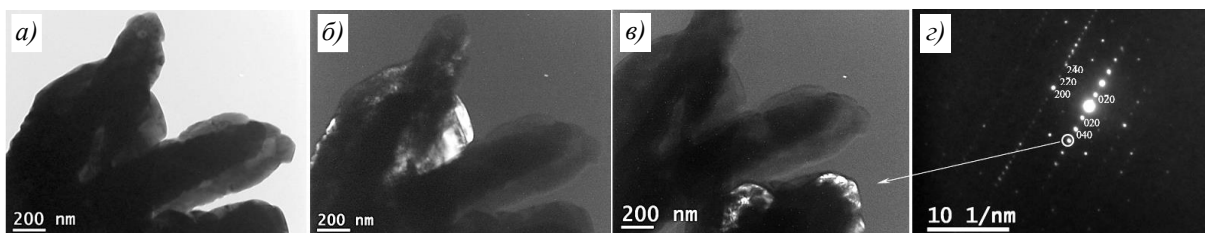


Рис. 7. Структура порошка  $V_2O_5$ , полученная методом просвечивающей электронной микроскопии: а – снимок частиц порошка (кристаллитов); б, в – темнопольные снимки отдельных кристаллов порошка в различных дифракционных рефлексах; г – дифракционная картина, соответствующая щербинаиту, ось зоны  $\langle 001 \rangle$

Схема сетки рефлексов орторомбической решетки с параметрами  $a = 3,5624 \text{ \AA}$ ,  $b = 11,5068 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,3748 \text{ \AA}$  для оси зоны  $\langle 001 \rangle$  приведена на рис. 8.

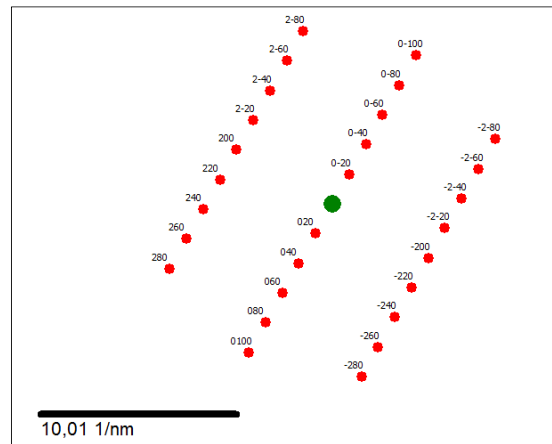
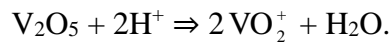


Рис. 8. Схема рефлексов орторомбической решетки пентоксида ванадия для оси зоны  $\langle 001 \rangle$

Область применения разработанного  $V_2O_5$ -электрода ограничивается растворами с рН в интервале 5–9 по причине его амфотерности. В кислых средах (рН < 4) происходило быстрое разрушение электрода из-за его растворения с образованием ионов  $VO_2^+$ :



При рН > 9 образуются различные ионы ванадата (V):  $VO_4^{3-}$ ,  $V_2O_7^{4-}$ ,  $V_3O_9^{3-}$ ,  $V_{10}O_{28}^{6-}$  и др.

Для слабокислого раствора (рН = 5) на циклической вольтамперограмме видны редокс-переходы (рис. 9). Пик окисления наблюдается при потенциале 560 мВ и, по-видимому, соответствует перезарядке V(IV)  $\rightarrow$  V(V). Расстояние между атомными слоями в кристаллической решетке пентоксида ванадия позволяет определить количество участвующих в перезарядке атомных слоев, равное  $\sim 34$ . Для расчета использовали следующую формулу:

$$N = L/c,$$

где  $N$  – количество атомных слоев;  $L$  – размер кристаллита (150 Å);  $c$  – параметр решетки (4,37 Å).

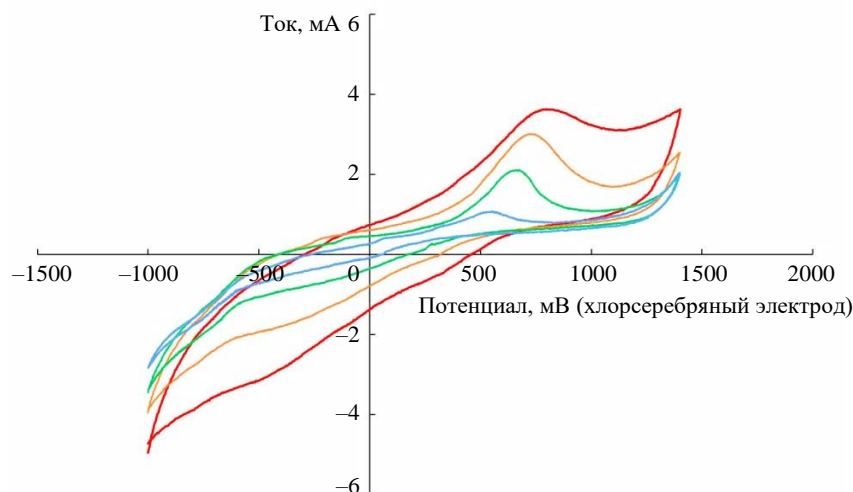


Рис. 9. Циклические вольтамперограммы  $V_2O_5/GC$ -электрода (где GC – стеклоуглерод) в фосфатном буферном растворе при рН = 4 и скорости развертки 1 (—), 2 (—), 5 (—) и 10 мВ/с (—)

Переход является необратимым: положение его максимума заметно смещается в область более положительных потенциалов при увеличении скорости развертки. Выраженный пик на обратном ходу вольтамперограммы отсутствует, однако катодные токи через электрод протекают, перегиб при скорости развертки 1 мВ/с наблюдается при потенциале 20 мВ. Разница потенциалов максимумов значительно превышает 59 мВ, что также свидетельствует о необратимости этого перехода. Кроме того, в области более отрицательных переходов наблюдается еще один редокс-переход, по-видимому, соответствующий процессу  $V(IV) \rightarrow V(III)$ , который хорошо заметен при скорости развертки 10 мВ/с: -450 мВ (катодный скан), -50 мВ (анодный скан).

Вывод о природе протекающих на электроде процессов и участии ионов водорода в них можно сделать на основании зависимости формы циклической вольтамперограммы от кислотности раствора (рис. 10).

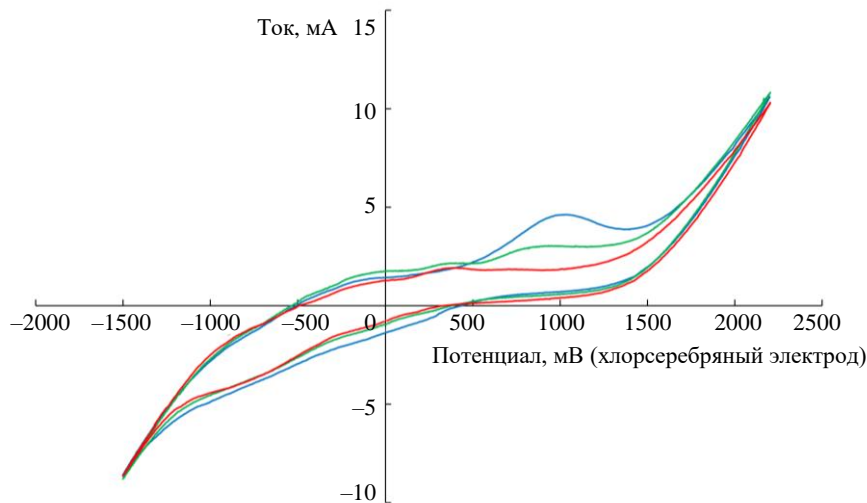


Рис. 10. Циклические вольтамперограммы при активной кислотности раствора 5 (—), 6 (—) и 7 (—)

Потенциалы пиков перехода  $V(V) \rightarrow V(IV)$  смещаются в область более положительных потенциалов при увеличении кислотности, что явно свидетельствует об участии ионов водорода в редокс-переходе. С другой стороны, потенциал перегиба кривой, соответствующий редокс-переходу  $V(IV) \rightarrow V(III)$ , практически не изменяется, а значит, ионы водорода в нем не участвуют.

### Заключения

В контексте глобальной стратегии декарбонизации авиационной отрасли и государственных инициатив РФ по снижению выбросов парниковых газов разработка новых систем накопления энергии, таких как магний-ионные аккумуляторы, является стратегически важной задачей. Такие аккумуляторы обладают значительным потенциалом благодаря высокой теоретической энергоемкости магниевго анода, доступности сырья и улучшенной безопасности по сравнению с литий-ионными аналогами.

Оксид ванадия ( $V_2O_5$ ) является перспективным катодным материалом для магний-ионных аккумуляторов благодаря слоистой структуре, способности к обратимой интеркаляции мультивалентных ионов, высокой теоретической удельной емкости и наличию нескольких стабильных степеней окисления ванадия ( $V^{5+}$ ,  $V^{4+}$ ,  $V^{3+}$ ).

Разработана методика синтеза чистого порошка  $V_2O_5$  (квалификация ч.д.а.) из технического реактива через стадию осаждения метаванадата аммония. Рентгенофазовый анализ подтвердил формирование орторомбической фазы  $V_2O_5$  (параметры решетки

$a = 3,5624 \text{ \AA}$ ,  $b = 11,5068 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,3748 \text{ \AA}$ ) с размером кристаллитов  $\sim 150 \text{ \AA}$ . Методами электронной микроскопии установлено, что синтезированный порошок характеризуется развитой агломерацией частиц разнообразной морфологии. Образование агломератов связывается с высоким уровнем рН ( $\sim(8,5-9,0)$ ) раствора прекурсора  $\text{NH}_4\text{VO}_3$ , что согласуется с данными научно-технической литературы о влиянии рН на морфологию  $\text{V}_2\text{O}_5$ .

Установлены границы электрохимической стабильности электрода из синтезированного  $\text{V}_2\text{O}_5$  в водных растворах: рН = 5–9. При рН < 4 происходит быстрое растворение материала с образованием  $\text{VO}_2^+$ , а при рН > 9 – образование растворимых поливанадатных анионов.

Циклическая вольтамперометрия в фосфатном буфере (рН = 5) выявила наличие двух редокс-переходов:

–  $\text{V (V)} \rightarrow \text{V (IV)}$ . Анодный пик выявлен при потенциале  $\sim 560 \text{ мВ}$ . Переход является необратимым (пик смещается с увеличением скорости развертки, разница потенциалов значительно превышает  $59 \text{ мВ}$ , отсутствует четкий катодный пик). Потенциал пика смещается в положительную область с увеличением кислотности, что однозначно указывает на участие ионов водорода в электрохимической реакции. Оценка на основе размера кристаллита ( $\sim 150 \text{ \AA}$ ) и параметра решетки  $c$  ( $4,3748 \text{ \AA}$ ) показала, что вдоль направления, перпендикулярного слоям, кристаллит состоит из  $\sim 34$  атомных слоев. Наблюдаемая необратимость перехода свидетельствует о значительных кинетических ограничениях, вероятно, связанных с затрудненной диффузией  $\text{H}^+$  вглубь кристаллитов;

–  $\text{V (IV)} \rightarrow \text{V (III)}$ . Наблюдается в области  $-450/-50 \text{ мВ}$  (катодный/анодный скан). В отличие от первого перехода, его потенциал не зависит от кислотности раствора, что указывает на отсутствие прямого участия  $\text{H}^+$  в этой электрохимической реакции.

Полученные результаты подтверждают потенциал синтезированного  $\text{V}_2\text{O}_5$  как катодного материала, но также выявляют возможные проблемы при его применении в магний-ионных аккумуляторах:

– проблема агломерации, снижающая доступную поверхность и ухудшающая ионный/электронный транспорт, особенно критичная для двухвалентных ионов  $\text{Mg}^{2+}$ ;

– кинетические ограничения (необратимость) редокс-перехода  $\text{V (V)} \rightarrow \text{V(IV)}$ , связанные с диффузионными барьерами в объеме частиц.

#### Список источников

1. Abrantes I., Ferreira A.F., Magalhaes L.B. et al. The impact of revolutionary aircraft designs on global aviation emissions // *Renewable Energy*. 2024. Vol. 223. P. 119937. DOI: 10.1016/j.renene.2024.119937.
2. Указ Президента Российской Федерации от 04.11.2020 № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов». URL: [www.kremlin.ru/acts/bank/45990](http://www.kremlin.ru/acts/bank/45990) (дата обращения: 24.09.2025).
3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.10.2021 № 3052-р. URL: <http://www.publication.pravo.gov.ru> (дата обращения: 24.09.2025).
4. Леонов А.А., Трофимов Н.В. Магний-ионные аккумуляторы: перспективы и вызовы в области энергетики // *Труды ВИАМ*. 2024. № 3 (133). С. 41–51. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-41-51.
5. Zhang J., Roumeliotis I., Zhang X., Zolotas A. Techno-economic-environmental evaluation of aircraft propulsion electrification: Surrogate-based multi-mission optimal design approach // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 175. P. 442–464.
6. Emmanouil K. Reliability in the era of electrification in aviation: A systems approach // *Microelectronics Reliability*. 2020. Vol. 114. P. 77–82.
7. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // *Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002*. М.: МИСИС – ВИАМ, 2002. С. 23–47.
8. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. № 3. С. 10–15.
9. Deivanayagam R., Ingram B.J., Shahbazian-Yassar R. Progress in development of electrolytes for magnesium batteries // *Energy Storage Materials*. 2019. No. 21. P. 136–153.

10. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. № 1. С. 3–4.
11. Багоцкий В.С. Основы электрохимии. М.: Химия, 1988. 400 с.
12. Xu R., Gao X., Chen Ya. et al. Research advances of the electrolytes for rechargeable magnesium ion batteries // *Materials Today Physics*. 2023. No. 36. P. 116–133.
13. Rashad M., Asif M., Ahmed I. et al. Quest for carbon and vanadium oxide based rechargeable magnesium-ion batteries // *Journal of magnesium and alloys*. 2020. Vol. 8. P. 364–373.
14. Zhang X., Li D., Ruan Q. et al. Vanadium-based cathode materials for rechargeable magnesium batteries // *Materials Today Energy*. 2023. No. 32. P. 169–199.
15. Tzu-Ho W. Controlling crystal structures of vanadium oxides via pH regulation and decoupling crystallographic perspective on zinc storage behaviors // *Acta Materialia*. 2022. Vol. 245. P. 118663. DOI: 10.1016/j.actamat.2022.118663.
16. Никифоров А.А., Демин С.А., Хмелева К.М. Электрохимическая обработка деталей, полученных методом селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. 2021. № 7 (101). С. 3–12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-3-12.
17. Сидорина А.И. Модификация поверхности углеродных армирующих наполнителей для полимерных композиционных материалов электрохимической обработкой (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 4 (110). С. 61–74. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-61-74.
18. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 4. С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
19. Леонов А.А., Заварзин С.В., Трофимов Н.В. О некоторых особенностях влияния состава магниевых анодов на его электрохимическое поведение применительно к магниевым аккумуляторам // Труды ВИАМ. 2024. № 6 (136). С. 18–28. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-18-28.

### References

1. Abrantes I., Ferreira A.F., Magalhaes L.B. et al. The impact of revolutionary aircraft designs on global aviation emissions. *Renewable Energy*, 2024, vol. 223, pp. 119937. DOI: 10.1016/j.renene.2024.119937.
2. Decree of the President of the Russian Federation of November 4, 2020 No. 666 «On the Reduction of Greenhouse Gas Emissions». Available at: [www.kremlin.ru/acts/bank/45990](http://www.kremlin.ru/acts/bank/45990) (accessed: September 24, 2025).
3. Order of the Government of the Russian Federation dated October 29, 2021 No. 3052-r. Available at: <http://www.publication.pravo.gov.ru> (accessed: September 24, 2025).
4. Leonov A.A., Trofimov N.V. Magnesium ion batteries: prospects and challenges in the field of energy. *Trudy VIAM*, 2024, no. 3 (133), pp. 41–51. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 24, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-41-51.
5. Zhang J., Roumeliotis I., Zhang X., Zolotas A. Techno-economic-environmental evaluation of aircraft propulsion electrification: Surrogate-based multi-mission optimal design approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, vol. 175, pp. 442–464.
6. Emmanouil K. Reliability in the era of electrification in aviation: A systems approach. *Microelectronics Reliability*, 2020, vol. 114, pp. 77–82.
7. Kablov E.N. Aviation Materials Science in the 21st Century. Prospects and Challenges. *Aviation Materials. Selected Works of VIAM 1932–2002*. Moscow: MISiS – VIAM, 2002, pp. 23–47.
8. Kablov E.N. Modern Materials – the Basis for Innovative Modernization of Russia. *Metally Evrazii*, 2012, no. 3, pp. 10–15.
9. Deivanayagam R., Ingram B.J., Shahbazian-Yassar R. Progress in development of electrolytes for magnesium batteries. *Energy Storage Materials*, 2019, no. 21, pp. 136–153.
10. Kablov E.N. Chemistry in Aviation Materials Science. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 3–4.
11. Bagotsky V.S. *Fundamentals of Electrochemistry*. Moscow: Khimiya, 1988, 400 p.
12. Xu R., Gao X., Chen Ya. et al. Research advances of the electrolytes for rechargeable magnesium ion batteries. *Materials Today Physics*, 2023, no. 36, pp. 116–133.

13. Rashad M., Asif M., Ahmed I. et al. Quest for carbon and vanadium oxide based rechargeable magnesium-ion batteries. *Journal of magnesium and alloys*, 2020, vol. 8, pp. 364–373.
14. Zhang X., Li D., Ruan Q. et al. Vanadium-based cathode materials for rechargeable magnesium batteries. *Materials Today Energy*, 2023, no. 32, pp. 169–199.
15. Tzu-Ho W. Controlling crystal structures of vanadium oxides via pH regulation and decoupling crystallographic perspective on zinc storage behaviors. *Acta Materialia*, 2022, vol. 245, p. 118663. DOI: 10.1016/j.actamat.2022.118663.
16. Nikiforov A.A., Demin S.A., Khmeleva K.M. Electrochemical treatment of parts obtained by selective laser fusion. *Trudy VIAM*, 2021, no. 7 (101), pp. 3–12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 24, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-3-12.
17. Sidorina A.I. Modification of the surface of carbon reinforcing fillers for polymer composite materials by electrochemical treatment (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), pp. 61–74. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 24, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-61-74.
18. Kablov E.N., Startsev O.V. The basic and applied research in the field of corrosion and ageing of materials in natural environments (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 4 (37), pp. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
19. Leonov A.A., Zavarzin S.V., Trofimov N.V. On some features of the influence of the composition of the magnesium anode on its electrochemical behavior in relation to magnesium-ion batteries. *Trudy VIAM*, 2024, no. 6 (136), pp. 18–28. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 24, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-18-28.

#### Информация об авторах

**Леонов Александр Андреевич**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Дуюнова Виктория Александровна**, начальник Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Трофимов Николай Вадимович**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Кузнецов Виталий Владимирович**, профессор, д.т.н., РХТУ им. Д.И. Менделеева, [pochta@muctr.ru](mailto:pochta@muctr.ru)

**Черкасов Дмитрий Игоревич**, научный сотрудник, РХТУ им. Д.И. Менделеева, [pochta@muctr.ru](mailto:pochta@muctr.ru)

**Макаренков Дмитрий Анатольевич**, заместитель руководителя Комплекса по технологическим процессам и аппаратам, д.т.н., доцент, НИЦ «Курчатовский институт», [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)

**Родионов Никита Михайлович**, лаборант-исследователь, НИЦ «Курчатовский институт», [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)

**Комендо Илья Юрьевич**, заместитель начальника отдела, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт», [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)

**Михлин Александр Леонидович**, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт», [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)

#### Information about the authors

**Alexander A. Leonov**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Viktoriya A. Dyunova**, Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Nikolay V. Trofimov**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Vitaly V. Kuznetsov**, Professor, Doctor of Sciences (Tech.), Mendeleev University, [pochta@muctr.ru](mailto:pochta@muctr.ru)

**Dmitry I. Cherkasov**, Researcher, Mendeleev University, [pochta@muctr.ru](mailto:pochta@muctr.ru)

**Dmitry A. Makarenkov**, Deputy Head of the Complex for Technological Processes and Equipment, Doctor of Sciences (Tech.), Associate Professor, NRC «Kurchatov Institute», [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)

**Nikita M. Rodionov**, Laboratory Research Assistant, NRC «Kurchatov Institute», [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)

**Ilya Yu. Komendo**, Deputy Head of Department, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute», [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)

**Alexander L. Mihlin**, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute», [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)

Статья поступила в редакцию 20.02.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 04.03.2026.  
The article was submitted 20.02.2026; approved and accepted for publication after reviewing 04.03.2026.