

Научная статья  
УДК 539.216  
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.003

## МИКРОНАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ АНОДНЫЕ ОКСИДЫ НИОБИЯ

**Наталья Михайловна Яковлева<sup>1</sup>, Анастасия Андреевна Горбачева<sup>2</sup>,  
Кристина Вячеславовна Степанова<sup>3</sup>, Елена Ананьевна Чупахина<sup>4</sup>,  
Александр Николаевич Кокатев<sup>5</sup>, Алиса Михайловна Шульга<sup>6</sup>**

<sup>1–6</sup>Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

<sup>1</sup>[nmyakov@gmail.com](mailto:nmyakov@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-4294-0183>

<sup>2</sup>[nastena.gorbacheva2010@gmail.com](mailto:nastena.gorbacheva2010@gmail.com)

<sup>3</sup>[lady.cristin4ik@yandex.ru](mailto:lady.cristin4ik@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4737-497X>

<sup>4</sup>[chelen@petrsu.ru](mailto:chelen@petrsu.ru)

<sup>5</sup>[kokatev@petrsu.ru](mailto:kokatev@petrsu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9449-1482>

<sup>6</sup>[shulga.alisa@gmail.com](mailto:shulga.alisa@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3844-7110>

### Аннотация

В докладе представлены результаты изучения анодных оксидных пленок (АОП), синтезированных с применением методики комбинированного анодирования Nb, ранее использованной для получения квазибарьерных АОП на алюминии. Комбинированное анодирование предусматривает формирование на 1-м этапе на поверхности Nb самоорганизованного пористого Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, а на 2-м — осуществляется ее повторное анодирование (реанодирование) в барьерообразующем электролите. Полученные данные о росте и структуре комбинированных АОП на Nb свидетельствуют, что в зависимости от условий процесса могут быть сформированы как гетерогенные рентгеноаморфные оксиды для электролитических конденсаторов, так и микрокристаллические Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> с потенциальной перспективой применения для создания суперконденсаторов.

### Ключевые слова:

ниобий, анодирование, реанодирование

### Для цитирования:

Микронаноструктурированные анодные оксиды ниобия / Н. М. Яковлева [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 23–29. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.003.

Original article

## MICRONOSTRUCTURED NIOBIUM ANODIC OXIDES

**Natalya M. Yakovleva<sup>1</sup>, Anastasiya A. Gorbacheva<sup>2</sup>, Kristina V. Stepanova<sup>3</sup>,  
Elena A. Chupahina<sup>4</sup>, Aleksander N. Kokatev<sup>5</sup>, Alisa M. Shulga<sup>6</sup>**

<sup>1–6</sup>Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

<sup>1</sup>[nmyakov@gmail.com](mailto:nmyakov@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-4294-0183>

<sup>2</sup>[nastena.gorbacheva2010@gmail.com](mailto:nastena.gorbacheva2010@gmail.com)

<sup>3</sup>[lady.cristin4ik@yandex.ru](mailto:lady.cristin4ik@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4737-497X>

<sup>4</sup>[chelen@petrsu.ru](mailto:chelen@petrsu.ru)

<sup>5</sup>[kokatev@petrsu.ru](mailto:kokatev@petrsu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9449-1482>

<sup>6</sup>[shulga.alisa@gmail.com](mailto:shulga.alisa@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3844-7110>

### Abstract

The report presents the results of a study of anodic oxide films (AOFs). They were synthesized using a combined Nb anodization technique. The technique was previously used to obtain quasi-barrier AOFs on aluminum. At the first stage, combined anodizing involves the formation of self-organized porous Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> on the Nb surface, and at the second stage, it is re-anodized (reanodized) in a barrier-forming electrolyte. The data obtained on the growth and structure of combined Nb-based AOFs indicate that both heterogeneous X-ray amorphous oxides for electrolytic capacitors and microcrystalline Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> with potential for use in supercapacitors can be formed. This depends on the process conditions.

### Keywords:

niobium, anodizing, re-anodizing

### For citation:

Micronanostructured niobium anodic oxides / N. M. Yakovleva [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 23–29. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.003.

## Введение

Анодные оксиды ниобия различной морфологии (регулярно пористые, барьерные, микроконусные) имеют широкий спектр как реализованных, так и потенциальных применений [1–9]. В частности, наноструктурированные анодные  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  применяются в качестве катализаторов и фотокатализаторов [1]. Интенсивно развивается использование оксидов ниобия в качестве электродных материалов для суперконденсаторов и литий-ионных аккумуляторов из-за хорошей химической стабильности и уникальной кристаллической структуры  $\gamma\text{-Nb}_2\text{O}_5$  [3–7]. Перспективны биомедицинские покрытия на основе пористого  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , имеющие коррозионную стойкость в 100 раз больше, чем у  $\text{TiO}_2$ , и оптимальный модуль упругости, близкий к костной ткани [8, 9]. Представляет интерес разработка новых методик формирования нано- и микроструктурированных анодных оксидных пленок (АОП) на Nb, что создаст возможности для дальнейшего расширения спектра их применения.

В статье представлены результаты изучения АОП, синтезированных с применением методики комбинированного анодирования компактного Nb, ранее использованной для получения толстых квазибарьерных АОП на алюминии [10]. Комбинированное анодирование компактного ниобия предусматривает формирование на поверхности металла нанопористой анодной оксидной пленки (ПАОП) и последующее реанодирование ПАОП в барьерообразующем электролите. Можно предположить, что такая методика в зависимости от условий процесса позволит получить как рентгеноаморфные АОП с отличными диэлектрическими свойствами и высокой удельной поверхностью, так и кристаллические микро- и наноструктурированные  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ .

Целью данной работы являлось изучение особенностей роста, структуры и электрофизических свойств анодных оксидов ниобия, синтезированных комбинированным анодированием.

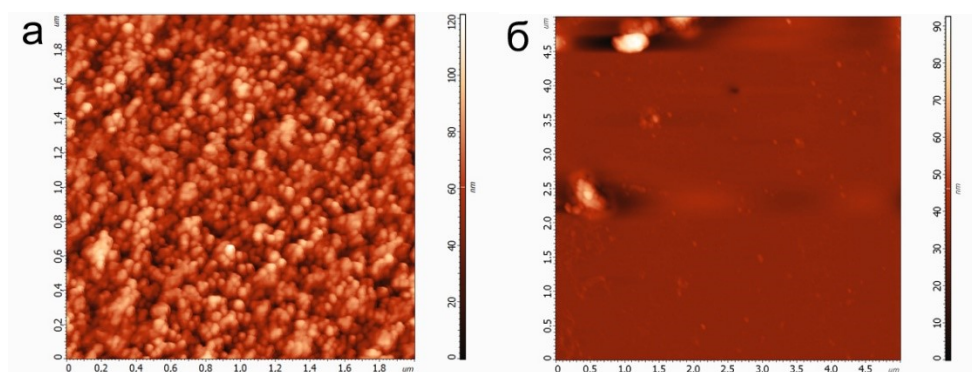
## Результаты

Объектами исследования являлись оксидные пленки, полученные анодированием предварительно отожженной ниобиевой фольги (98,88 % Nb). До анодирования проводилась химическая очистка образцов в ультразвуковой ванне. Она состояла из нескольких этапов (выдержка по времени 10 мин для каждого этапа): ацетон → дистиллированная вода → этиловый спирт → дистиллированная вода. Было получено несколько серий образцов: пористые анодные оксидные пленки (ПАОП) — серия 1, барьерные (БАОП) — серии 2, 3, а также комбинированные (КАОП) — серии 3, 4. В последнем случае на 1-й стадии формировалась самоорганизованная пористая АОП, а на 2-й — осуществлялось ее реанодирование в барьерообразующем электролите. Для формирования ПАОП использовалось анодирование Nb в водном растворе 10 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$  + 1 % HF ( $U_a = 20$  В,  $t_a = 60$  мин) в соответствии с условиями, предложенными в работе [11]. Синтез АОП барьерного типа и реанодирование ПАОП проводились в двух электролитах: водном растворе 0,06 %  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (далее фосфорнокислый электролит — ФКЭ, удельное сопротивление  $\rho_s = 4 \cdot 10^2$  Ом/см), традиционно применяемом для получения классических барьерных оксидов на Nb [12; 13]), и так называемом высоковольтном электролите 4 г/л  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (ВВЭ с удельным сопротивлением  $\rho_s = 3,8 \cdot 10^4$  Ом/см), ранее использованном для формирования АОП барьерного типа на Al до  $U_a = 120\text{--}1500$  В [10]. Поскольку ВВЭ имеет на 2 порядка большее значение  $\rho_s$ , то можно предположить, что напряжение искрения  $U_{искр}$  в ВВЭ будет выше, чем в ФКЭ, а значит, формируя БАОП в ВВЭ, можно заметно повысить значение  $U_a$ .

Формирование барьерных АОП в ФКЭ выполнялось при плотности тока  $j_a = 1$  мА/см<sup>2</sup> до различных значений напряжения в диапазоне от 80 до 300 В. Анодирование Nb в ВВЭ проводилось впервые. Использовались значения напряжения  $U_a$  от 100 до 500 В и  $j_a = 2$  мА/см<sup>2</sup>. В процессе роста АОП с помощью электронного самописца Эрбий-7115, сопряженного с компьютером, регистрировались зависимости напряжения и плотности тока от времени  $U_a(t)$  и  $j_a(t)$ . Изучение морфологии поверхности выполнялось методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

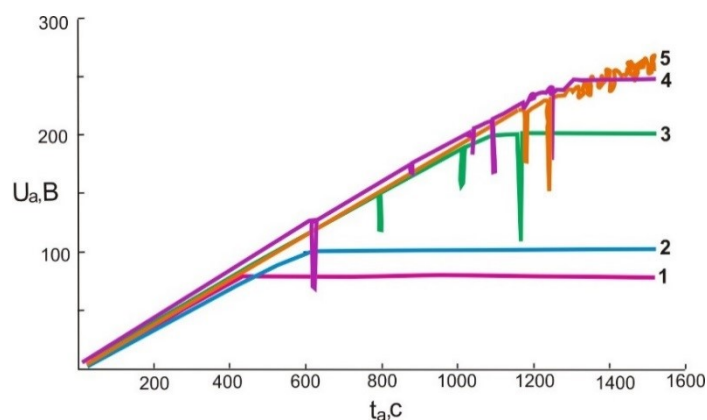
Вид зарегистрированных зависимостей  $j_a(t)$  типичен для роста регулярно пористых АОП [11], когда после начальной стадии резкого спада тока до  $j_a \sim 0,6$  мА/см<sup>2</sup> наблюдается рост тока до значения, равного  $j_a' \approx 0,8\text{--}0,9$  мА/см<sup>2</sup>, с последующим постепенным уменьшением до  $j_a^{cm} \approx 0,7$  мА/см<sup>2</sup>. После

чего величина плотности тока практически не меняется до конца процесса ( $t_a = 1$  ч). На следующем этапе методом АСМ было проведено исследование морфологии поверхности ПАОП (рис. 1, а). Видно, что на поверхности ПАОП наблюдается слабоупорядоченный пористый рельеф с эффективным диаметром открытых пор  $\langle d_p \rangle = (11 \pm 4)$  нм, что согласуется с данными [11]. Некоторые фрагменты оксидной пленки удалось отделить от подложки и сделать оценку толщины АОП, результаты которой показали, что толщина ПАОП не превышает 500 нм. Кроме того, часть АОП была отделена от подложки с помощью скотча, что позволило провести изучение рельефа поверхности барьерного слоя. Было установлено, что на поверхности барьерного слоя присутствуют ячейки с эффективным диаметром  $\langle D_c \rangle = (45 \pm 15)$  нм. Рентгенографирование образцов фольги до и после формирования ПАОП показало присутствие на рентгенограммах лишь отражений от металлической подложки, дополнительных отражений от других фаз не было выявлено. Данный факт позволяет предположить, что синтезированные ПАОП являются рентгеноаморфными.



**Рис. 1.** АСМ-изображения поверхности: пористого слоя АОП, полученных в  $1 \text{ M H}_2\text{SO}_4 + 1 \% \text{ HF}$ ,  $U_a = 20 \text{ В}$ ,  $t_a = 60$  мин (а); БАОП, полученной в ФКЭ,  $j_a = 1 \text{ mA/cm}^2$ ,  $t_a = 60$  мин,  $U_a = 100 \text{ В}$  (б)

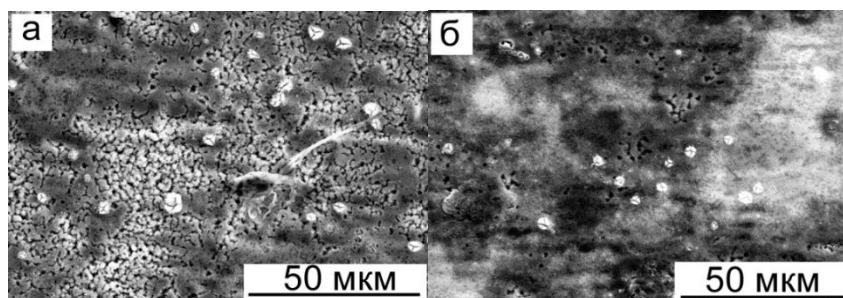
При росте  $U_a$  происходит и изменение цвета образовавшейся в ФКЭ пленки: от зеленого (80 В) и розоватого (100, 200 В) до серого (300 В), что соответствует увеличению толщины БАОП. Как следует из [12], постоянная роста ( $\alpha$ ) оксидной пленки для аналогичных условий имеет значение  $\alpha = 2,5 \text{ нм/В}$ , тогда толщина БАОП, сформированных в ФКЭ, должна увеличиваться с ростом напряжения от 200 до 750 нм. Как видно из рис. 2, все зависимости  $U_a(t)$  носят линейный характер, типичный для синтеза БАОП. Для напряжений от 80 до 300 В скорость роста напряжения практически одинакова ( $\langle dU_a/dt \rangle \approx 0,18 \text{ В/с}$ ), но при увеличении  $U_a$  до 250 В на  $U_a(t)$  появляются скачки напряжения (рис. 2, кривые 4 и 5).



**Рис. 2.** Зависимости  $U_a(t)$  для БАОП, полученных в ФКЭ при различных  $U_a$ , В:  
1 — 80; 2 — 100; 3 — 200; 4 — 250; 5 — 300

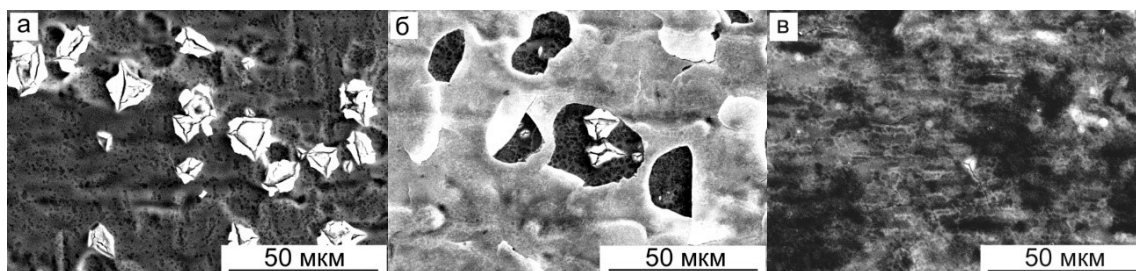
Согласно [12; 13], вплоть до  $U_a=200$  В атомная структура БАОП является рентгеноаморфной, напряжение искрения имеет величину  $\sim 190$  В, а напряжение пробоя  $\sim 250$  В. Можно предположить, что при  $U_a \geq 200$  В имеют место искрение и локальный пробой, сопровождаемые частичной кристаллизацией растущей оксидной пленки, чем и обусловлено присутствие скачков напряжения (см. рис. 2). Как следует из АСМ-изображения БАОП, полученной при  $U_a = 100$  В (см. рис. 1, б), поверхность оксида достаточно однородна, что типично для рентгеноаморфных БАОП.

Изучение морфологии поверхности БАОП, полученной при  $U_a = 300$  В, было выполнено методом СЭМ (рис. 3, а). В отличие от БАОП, полученных при более низких напряжениях (от 80 до 200 В), поверхность явно неоднородна. Наблюдается появление бутоноподобных образований с линейным размером  $\sim 3\text{--}5$  мкм, а также хорошо заметны следы, обусловленные процессом искрения (ширина  $\sim 0,5$  мкм). Подобные явления должны способствовать возникновению кристаллической компоненты в оксиде, что согласуется с данными [14]. Попытка провести анодирование при  $U_a \geq 300$  В оказалась неудачной и приводила к прекращению процесса, скорее всего, за счет образования сквозных трещин в АОП. Отсюда следует, что значение  $U_a = 300$  В является предельным для анодирования Nb в ФКЭ. Для БАОП, полученных в ВВЭ при  $U_a = 100$  и 200 В, с учетом большой величины падения напряжения на электролите, ход  $U_a(t)$  также является линейным и величина скорости роста напряжения равна  $dU_a/dt = 0,32$  В/с, а морфология поверхности однородна, что характерно для классических БАОП. В ВВЭ удалось провести анодирование при значениях  $U_a = 300\text{--}500$  В. Было установлено, что максимальная величина напряжения, при котором еще возможно анодирование Nb в ВВЭ, в этом случае составляет  $U_{a, \max} = 570$  В.



**Рис. 3.** СЭМ-изображения: БАОП, полученной в 0,06 %  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $j_a = 1$   $\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $t_a = 60$  мин при  $U_a = 300$  В (а); КАОП, полученной в результате реанодирования ПАОП при тех же условиях (б)

Из СЭМ-изображений АОП, синтезированных в ВВЭ при  $U_a \geq 300$  В (рис. 4, а), видно, что на поверхности имеет место образование «цветоподобных» объектов размерами от 10 до 20 мкм и сетки микротрещин. Аналогичная морфология анодного оксида ниобия, формируемого в процессе пробоя и имеющего кристаллическую структуру  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , описана в работе [15]. По всей видимости, при данных условиях анодирования Nb в ВВЭ также происходит кристаллизация оксидного слоя, обусловленная явлениями пробоя и искрения.



**Рис. 4.** СЭМ-изображения поверхности: БАОП, полученных в ВВЭ при  $U_a = 300$  В (а); КАОП, реанодированных в ВВЭ при  $U_{pa} = 300$  (б) и 500 (в) В

На следующем этапе было апробировано формирование АОП на Nb с помощью методики комбинированного анодирования, состоящей из двух стадий: на первой формируется самоорганизованная нанопористая АОП (см. рис. 1, а), а на второй стадии происходит ее реанодирование в барьерообразующих электролитах (ФКЭ и ВВЭ) при различных значениях напряжения. Предположительно [10; 14], в результате реанодирования происходит как заполнение пор, так и увеличение толщины барьерного слоя ПАОП.

Методом АСМ было установлено, что в результате реанодирования ПАОП в ФКЭ при  $U_{pa} = 100, 150, 200$  и  $250$  В заполнения пор не происходит: на поверхности комбинированных АОП четко прослеживалась нанопористая структура с высотой рельефа  $100\text{--}140$  нм. Возможно, причиной этого является то, что рост БАОП на 2-й стадии на границе металл/оксид происходит быстрее, чем на границе оксид/электролит [13]. Учитывая значения чисел переноса для  $Nb^{5+}$  и  $O^{2-}$  [14], зная толщину ( $300\text{--}500$  нм) и диаметр пор ПАОП, можно оценить степень заполнения пор и увеличение толщины барьерного слоя в зависимости от значения  $U_{pa}$ . Расчет показал, что для полного заполнения пор  $U_{pa}$  должно быть не менее  $450\text{--}500$  В, которое недостижимо в ФКЭ. Как следует из СЭМ-изображений КАОП, на поверхности реанодированного в ФКЭ при  $U_{pa} = 300$  В пористого оксида (см. рис. 3, б) четко прослеживаются следы искрения и пробоя, поскольку в этом случае АОП получена при напряжении, превышающем напряжение пробоя и искрения. Заметны микроскопические округлые образования с линейным размером  $3\text{--}4$  мкм, скорее всего, представляющие собой следы кристаллической фазы [14].

Апробация реанодирования ПАОП в ВВЭ была выполнена при напряжениях  $U_{pa} = 100, 200, 300, 400$  и  $500$  В. В гальваностатической стадии при  $U_{pa} = 100$  и  $200$  В имел место линейный рост напряжения со скоростью  $dU_{pa}/dt = 0,9$  В/с. При значении  $U_{pa} \geq 300$  В (для  $300, 400$  и  $500$  В) наблюдается уменьшение скорости роста напряжения на  $15\text{--}20\%$ , а на вольтстатической стадии — значительное возрастание конечного значения плотности тока, для  $U_{pa} = 500$  В более чем в 20 раз, что может быть обусловлено локальным пробоем, сопровождающимся кристаллизацией рентгеноаморфного оксида. Изучение морфологии поверхности КАОП, реанодированных в ВВЭ при  $300, 400$  и  $500$  В, методом СЭМ показало, что при  $U_{pa} = 300$  и  $400$  В полного заполнения пор не происходит, наблюдается отслаивание оставшегося незаполненным пористого слоя (см. рис. 3, б). Причем под остатками пористого слоя видны цветоподобные объекты и сетка трещин. В то же время характер рельефа поверхности КАОП, реанодированных в ВВЭ при  $500$  В (см. рис. 3, в), позволяет в этом случае говорить о полном заполнении пор ПАОП, что подтверждается и теоретической оценкой (с учетом соотношения чисел переноса ионов ниобия и кислорода), показавшей, что для заполнения пор напряжение реанодирования должно достигать  $450\text{--}500$  В. Как следует из рис. 3, в, на поверхности КАОП для  $U_{pa} = 500$  В наблюдаются округлые объекты микронных размеров, причиной появления которых может служить кристаллизация АОП при пробое.

Таким образом, результаты исследования анодных оксидов ниобия, сформированных в условиях впервые реализованной методики комбинированного анодирования ниобиевой фольги, показали, что в зависимости от напряжения и электролита реанодирования могут быть получены как гетерогенные рентгеноаморфные АОП с регулярно пористой надстройкой (частичное заполнение пор и увеличение толщины барьерного слоя на границе металл/оксид — при низких напряжениях реанодирования), так и микрокристаллические анодные оксиды как с пористой надстройкой (при напряжениях реанодирования до  $450$  В), так и без нее (при напряжениях реанодирования свыше  $450$  В).

## Выводы

1. Разработана методика формирования гетерогенных рентгеноаморфных АОП на Nb, состоящих из квазибарьерного слоя, толщина которого определяется напряжением реанодирования ПАОП, и регулярно пористой надстройки. Для получения таких оксидов напряжение реанодирования не должно превышать  $200$  В. Перспективно использование таких покрытий с высокой удельной поверхностью как элемента ниобиевых электролитических конденсаторов.

2. Для получения кристаллических микроструктур  $Nb_2O_5$  следует использовать при комбинированном анодировании напряжения, превышающие напряжения искрения и пробоя. Анодные оксиды такого типа, благодаря высокой пористости и кристаллической структуре, перспективны для применения в электрохимических суперконденсаторах.

## Список источников

1. Guo W., Yang L., Lu J., Gao P., Li W., Feng Z. An accurate growth mechanism and photocatalytic degradation of rhodamine B of crystalline Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanotube arrays // *Catalysts*. 2020. Vol. 10. P. 1480–1494.
2. Ab Kadir R., Abdul Rani R., Alsaif M., Ou J. Z., Wlodarski W., O'Mullane A. P., Kalantar-zadeh K. Optical gas sensing properties of nanoporous Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2015. Vol. 7, no. 8. P. 4751–4758.
3. Pang R., Wang Z., Li J., Chen K. Polymorphs of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> compound and their electrical energy storage applications // *Materials*. 2023. Vol. 16. P. 6956–6993.
4. Lin J., Zhao S., Jervis R., Shearing P. Probing the electrochemical processes of niobium pentoxides (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) for high-rate lithium-ion batteries: A review // *ChemElectroChem*. 2024. Vol. 11. P. 1–15.
5. Koroni C., Dixon K., Barnes P., Hou D. and etc. Morphology and Crystallinity Effects of Nanochanneled Niobium Oxide Electrodes for Na-Ion Batteries // *ACS Nanosci. Au*. 2024. Vol. 4. P. 76–84.
6. Van den Bergh W., Lokupitiya H. N., Vest N. A., Reid B., Guldin S., Stefik M. Nanostructure Dependence of T-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Intercalation Pseudocapacitance Probed Using Tunable Isomorphic Architectures // *Adv. Funct. Mater.* 2021. Vol. 31. P. 2007826–2007837.
7. Sahoo S., Gandham A. K., Pal V. K. Effective Nano-manufacturing of T-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> for supercapacitor applications // *Energy Storage and Conversion*. 2024. Vol. 2(4). P. 2074–2083.
8. Safavi M. S., Walsh F. C., Visai L., Khalil-Allafi J. Progress in niobium oxide containing coatings for biomedical applications: A critical review // *ACS Omega*. 2022. Vol. 7, no. 10. P. 9088–9107.
9. Pauline S. A., Rajendran N. Biomimetic novel nanoporous niobium oxide coating for orthopaedic applications // *Appl. Surf. Sci.* 2014. Vol. 290. P. 448–457.
10. Yakovleva N. M., Yakovlev A. N., Chupakhina E. A. Structural analysis of alumina films produced by two-step electrochemical oxidation // *Thin Solid Films*. 2000. Vol. 366. P. 37–42.
11. Sieber I., Hildebrand H., Friedrich A., Schmuki P. Formation of self-organized niobium porous oxide on niobium // *Electrochemistry Communications*. 2005. Vol. 7. P. 97–100.
12. Одынец Л. Л., Орлов В. М. Анодные оксидные пленки. Л.: Наука, 1990. 220 с.
13. Мирзоев Р. А., Давыдов А. Д. Анодные процессы электрохимической и химической обработки металлов : учебное пособие для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. СПб.: Лань, 2022. 440 с.
14. Ono S., Nagasaka T., Shimazaki H., Asoh, H. Fabrication of porous niobia by anodizing of niobium // *The Electrochemical Society Proceedings Series*, Pennington, NJ. 2006. Vol. 19. P. 123–133.

## References

1. Guo W., Yang L., Lu J., Gao P., Li W., Feng Z. An accurate growth mechanism and photocatalytic degradation of rhodamine B of crystalline Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanotube arrays. *Catalysts*, 2020, vol. 10, pp. 1480–1494.
2. Ab Kadir R., Abdul Rani R., Alsaif M., Ou J. Z., Wlodarski W., O'Mullane A. P., Kalantar-zadeh K. Optical gas sensing properties of nanoporous Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, vol. 7, no. 8, pp. 4751–4758.
3. Pang R., Wang Z., Li J., Chen K. Polymorphs of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> compound and their electrical energy storage applications. *Materials*, 2023, vol. 16, pp. 6956–6993.
4. Lin J., Zhao S., Jervis R., Shearing P. Probing the electrochemical processes of niobium pentoxides (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) for high-rate lithium-ion batteries: A review. *ChemElectroChem*, 2024, vol. 11, pp. 1–15.
5. Koroni C., Dixon K., Barnes P., Hou D. and etc. Morphology and Crystallinity Effects of Nanochanneled Niobium Oxide Electrodes for Na-Ion Batteries. *ACS Nanosci. Au*, 2024, vol. 4, pp. 76–84.
6. Van den Bergh W., Lokupitiya H. N., Vest N. A., Reid B., Guldin S., Stefik M. Nanostructure Dependence of T-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Intercalation Pseudocapacitance Probed Using Tunable Isomorphic Architectures. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, vol. 31, pp. 2007826–2007837.
7. Sahoo S., Gandham A. K., Pal V. K. Effective Nano-manufacturing of T-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> for supercapacitor applications. *Energy Storage and Conversion*, 2024, vol. 2 (4), pp. 2074–2083.
8. Safavi M. S., Walsh F. C., Visai L., Khalil-Allafi J. Progress in niobium oxide containing coatings for biomedical applications: A critical review. *ACS Omega*, 2022, vol. 7, no. 10, pp. 9088–9107.
9. Pauline S. A., Rajendran N. Biomimetic novel nanoporous niobium oxide coating for orthopaedic applications. *Appl. Surf. Sci.*, 2014, vol. 290, pp. 448–457.
10. Yakovleva N. M., Yakovlev A. N., Chupakhina E. A. Structural analysis of alumina films produced by two-step electrochemical oxidation. *Thin Solid Films*, 2000, vol. 366, pp. 37–42.

11. Sieber I., Hildebrand H., Friedrich A., Schmuki P. Formation of self-organized niobium porous oxide on niobium. *Electrochemistry Communications*, 2005, vol. 7, pp. 97–100.
12. Odyne L. L., Orlov V. M. *Anodnye oksidnye plenki* [Anodic oxide films]. Leningrad, Nauka, 1990, 220 p. (In Russ.).
13. Mirzoev R. A., Davydov A. D. *Anodnye processy jelectrohimicheskoy i himicheskoy obrabotki metallov* [Anodic processes of electrochemical and chemical treatment of metals]. Saint Petersburg, Lan', 2022, 440 p. (In Russ.).
14. Ono S., Nagasaka T., Shimazaki H., Asoh, H. Fabrication of porous niobia by anodizing of niobium. *The Electrochemical Society Proceedings Series, Pennington, NJ*, 2006, vol. 19, pp. 123–133.

#### ***Информация об авторах***

**Н. М. Яковлева** — доктор физико-математических наук;  
**А. А. Горбачева** — студентка;  
**К. В. Степанова** — кандидат технических наук;  
**Е. А. Чупахина** — кандидат физико-математических наук;  
**А. Н. Кокатев** — кандидат технических наук;  
**А. М. Шульга** — инженер.

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

**N. M. Yakovleva** — DSc (Physics & Mathematics);  
**A. A. Gorbacheva** — Student;  
**K. V. Stepanova** — PhD (Engineering);  
**E. A. Chupahina** — PhD (Physics & Mathematics);  
**A. N. Kokatev** — PhD (Engineering);  
**A. M. Shulga** — Engineer.

Статья поступила в редакцию 02.06.2025; одобрена после рецензирования 23.06.2025; принята к публикации 07.07.2025.  
The article was submitted 02.06.2025; approved after reviewing 23.06.2025; accepted for publication 07.07.2025.