

© Коллектив авторов, 2026
УДК 616.717.3:021.2
DOI – <https://doi.org/10.14300/mnnc.2026.21010>
ISSN – 2073-8137

Исследование эмбриоцитотоксичности материалов для имплантационной хирургии на основе сплавов титана и циркония с использованием модели хориоаллантаоисной мембраны куриного эмбриона *in vivo*

Ал. Ал. Долгалев¹, М. С. Багдасарян¹, Н. Н. Коваль², Ю. Ф. Иванов²,
М. С. Воробьев², А. А. Хрипунова¹, Д. З. Чониашвили³, К. Ю. Пархоменко⁴

¹ Ставропольский государственный медицинский университет,
Российская Федерация

² Институт сильноточной электроники Сибирского отделения
Российской академии наук, Томск, Российская Федерация

³ Северо-Осетинский государственный университет им. К. Л. Хетагурова,
Владикавказ, Российская Федерация

⁴ ООО «СК НИЛ МедТех», Ставрополь, Российская Федерация

In vivo study of the embryocytotoxicity of implant materials based on titanium and zirconium alloys using the chick embryo chorioallantoic membrane model

Dolgalev Al. Al.¹, Bagdasaryan M. S.¹, Koval N. N.², Ivanov Yu. F.²,
Vorobyev M. S.², Khripunova A. A.¹, Choniashvili D. Z.³, Parkhomenko K. Yu.⁴

¹ Stavropol State Medical University, Russian Federation

² Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Tomsk, Russian Federation

³ K. L. Khetagurov North Ossetian State University, Vladikavkaz, Russian Federation

⁴ SK NIL MedTech LLC, Stavropol, Russian Federation

Изучена биосовместимость образцов для имплантационной хирургии на основе различных сплавов титана и циркония. Моделью исследования являлась хориоаллантаоисная оболочка (ХАО) куриного эмбриона как одна из наиболее чувствительных сред для изучения биосовместимости материалов. На 9-е и 13-е сутки эмбриогенеза фиксировали морфологические и сосудистые изменения в ХАО. Выявлена высокая биосовместимость образцов диоксида титана (TiO₂) и сплава титана-алюминия-ванадия (BT6), показавших сохранение плотной разветвлённой сосудистой сети и отсутствие признаков сосудистой деградации. Выраженный эффект угнетения сосудистой сети продемонстрировал сплав титана-ниобия-циркония-тантала (TiNbZrTa). Проведенное исследование выявило наиболее перспективные покрытия для нанесения на поверхность имплантатов, в отношении которых необходимо продолжить дальнейшие эксперименты *in vivo*.

Ключевые слова: сплавы титана, биосовместимость, ангиогенез, хориоаллантаоисная мембрана, имплантационные материалы

The biocompatibility of samples for implantation surgery based on various titanium and zirconium alloys was studied. The study model was the chorioallantoic membrane (CAM) of the chicken embryo, as one of the most sensitive methods for studying the primary biocompatibility reaction of materials. On the 9th and 13th days of embryogenesis, morphological and vascular changes in CAM were recorded. A high biocompatibility of titanium dioxide (TiO₂) and titanium-aluminum-vanadium alloy (BT6) samples was revealed, which showed the preservation of a dense branched vascular network and the absence of signs of vascular degradation. The titanium-niobium-zirconium-tantalum alloy (TiNbZrTa) demonstrated a pronounced effect of vascular network suppression. The study revealed the most promising coatings for application to the surface of implants, for which it is necessary to continue further experiments *in vivo*.

Key words: titanium alloys, biocompatibility, angiogenesis, chorioallantoic membrane, implantation materials

Для цитирования: Долгалев Ал. Ал., Багдасарян М. С., Коваль Н. Н., Иванов Ю. Ф., Воробьев М. С., Хрипунова А. А., Чониашвили Д. З., Пархоменко К. Ю. Исследование эмбриоцитотоксичности материалов для имплантационной хирургии на основе сплавов титана и циркония с использованием модели хориоаллантоисной мембраны куриного эмбриона *in vivo*. *Медицинский вестник Северного Кавказа*. 2026;21(1):48-53. DOI – <https://doi.org/10.14300/mnnc.2026.21010>

For citation: Dolgalev Al. Al., Bagdasaryan M. S., Koval N. N., Ivanov Yu. F., Vorobyev M. S., Khripunova A. A., Choniashvili D. Z., Parkhomenko K. Yu. *In vivo* study of the embryocytotoxicity of implant materials based on titanium and zirconium alloys using the chick embryo chorioallantoic membrane model. *Medical News of North Caucasus*. 2026;21(1):48-53. DOI – <https://doi.org/10.14300/mnnc.2026.21010> (In Russ.)

ХАО – хориоаллантоисная оболочка
ЦТ – цитотоксичность
BT6 – сплав титан-алюминий-ванадий
TiNb – ниобид титана
TiNbO₂ – оксиниобат титана
TiNbTa – сплав титан-ниобий-тантал

TiNbZr – сплав титан-ниобий-цирконий
TiNbZrTa – сплав титан-ниобий-цирконий-тантал
TiNbZrTaO – оксидированный сплав титан-ниобий-цирконий-тантал
TiO₂ – диоксид титана

Одной из актуальных проблем современной имплантологии является разработка биосовместимых покрытий и материалов, решение которой в полной мере соответствует направлениям Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. Биосовместимость материалов охватывает иммунологические, морфофункциональные и биомеханические аспекты [1]. Имплантируемые устройства не должны провоцировать локальное или системное воспаление, а также способствовать появлению осложнений. Важно, чтобы они сохраняли свои исходные характеристики на протяжении всего периода эксплуатации, обеспечивая клиническую безопасность применения [2, 3].

В ряде исследований показано, что сплав титана, содержащий алюминий и ванадий (BT6), обладает выраженной цитотоксичностью. Это подтверждает необходимость нанесения защитных покрытий на медицинские изделия, изготовленные из этого сплава [4–7].

Наиболее перспективным направлением развития медицинского материаловедения является разработка сверхтонких биосовместимых покрытий на основе сплавов титана, циркония, обладающих свойствами, присущими натуральной кости и позволяющими поддерживать функцию клеточной адгезии после имплантации, способствуя восстановлению костной ткани. В данном исследовании изучаются свойства новых типов биосовместимых покрытий на основе среднеэнтропийных сплавов титан-ниобий-тантал (TiNbTa) и титан-ниобий-цирконий (TiNbZr) и их оксидов, разработанных научным коллективом Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук [8, 9].

Химический состав, структура и текстура поверхности материала обычно определяют его основные характеристики. Взаимодействие этих свойств сложно прогнозировать в условиях *in vivo*, поэтому окончательные результаты могут быть получены только эмпирическим путем. Среди экспериментов *in vivo* анализ хориоаллантоисной оболочки (ХАО) развивающегося куриного эмбриона представляет собой довольно быстрый, простой, воспроизводимый и практичный метод для изучения первичной реакции биосовместимости материалов. Наличие или отсутствие воспалительной и других реакций в месте имплантации, а также ги-

бель куриного эмбриона являются хорошим способом оценки токсических свойств инженерных конструкций [10]. Главным преимуществом этого метода по сравнению с другими подходами считается хорошая визуализация первоначальной реакции ткани [11].

Цель исследования – оценка биосовместимости и ангиогенеза *in vivo* на модели хориоаллантоисной мембраны куриного эмбриона образцов покрытий на основе титана, циркония и их сплавов, нанесенных на имплантаты с использованием вакуумно-дугового напыления с плазменным асистируанием.

Материал и методы. Исследованы образцы металлических изделий с покрытиями: диоксид титана (TiO₂), ниобид титана (TiNb), оксиниобат титана (TiNbO₂), BT6, титан-ниобий-цирконий-тантал (TiNbZrTa), оксидированный сплав титан-ниобий-цирконий-тантал (TiNbZrTaO). Биосовместимость образцов изучали на модели ХАО куриного эмбриона в соответствии с методикой, описанной в современных исследованиях стоматологических имплантатов и материалов для костной регенерации [5, 12]. Для эксперимента оплодотворенные яйца обрабатывали 70 % этанолом и инкубировали в автоматическом инкубаторе Rcom Maru Deluxe Max 380 (AUTOELEX CO., LTD, Корея). На 3-й день инкубации из острого полюса яйца через просверленное отверстие аспирировали 3 мл белка. Отверстие запечатывали стерильным парафином. На 8-й день инкубации в скорлупе вырезали квадратное окно размером ≈2,5 см² и на ХАО помещали стерильные изделия перечисленных 6 вариантов по одному образцу на яйцо. Стерильные круглые покровные стекла аналогичного диаметра (5 мм) на основе силикатного стекла использовали в качестве контроля. Для предотвращения обезвоживания отверстие в скорлупе герметизировали прозрачной лентой и продолжали инкубировать яйца еще 6 суток.

Все манипуляции с ХАО куриного эмбриона проводили в боксе абактериальной воздушной среды БАНп-01-«Ламинар-С»-1,5 (LORICA, ЗАО «Ламинарные системы», Россия). На 14 день эмбрионы подвергали эвтаназии в газовой камере (углекислый газ 70 %, 30 минут). Снимали герметизирующую ленту, яйца вскрывали, имплантируемые изделия иссекали с окружающими участками тканей ХАО. Микроскопическую оценку участков ХАО, контактирующих с имплантируемыми издели-

ями, проводили с использованием микроскопа Axio ZOOM.V16, оснащенного системой визуализации изображений AxioCam MRc5 и программным пакетом Zen 2 Pro (Carl Zeiss Microscopy, Oberkochen, Германия).

Статистическую обработку данных проводили с использованием методов описательной статистики (среднее арифметическое, стандартная ошибка, медиана, 25-й и 75-й процентиля) в пакете прикладных программ SPSS v. 27.0 (IBM, США). Для выявления различий количественных данных в исследуемых группах использовали однофакторный дисперсионный анализ.

Результаты и обсуждение. В проведенном эксперименте была оценена сохранность сосудистых структур в 48 биологических образцах (по 8 образцов в каждой группе). Критерием биосовместимости служила доля яиц с интактными сосудами на момент завершения эксперимента. Общая сохранность сосудов составила $37,5 \pm 15,2\%$, однако выявлена значительная вариабельность между группами. Наибольшая деградация сосудов зафиксирована у изделий с покрытием TiNbZrTa (отсутствие сохранности), тогда как TiO₂ продемонстрировал полную структурную целостность (100 % сохранность сосудов) (рис. 1).

Результат микроскопического анализа ХАО выявил значительную вариабельность плотности сосудистой сети. Образец с покрытием TiO₂ продемонстрировал максимальную плотность сосудов

на всех 8 биологических моделях, тогда как на образце с TiNbZrTa они полностью отсутствовали (рис. 2).

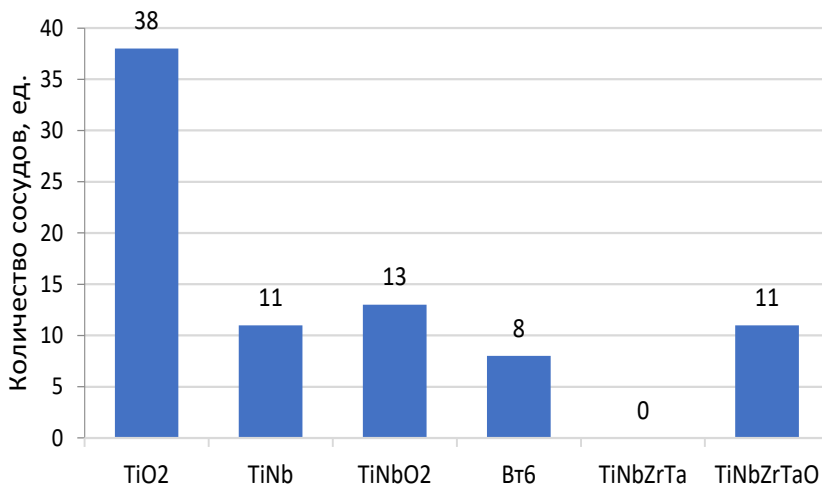


Рис. 2. Среднее количество сосудов, выявленное на хориоаллантаоисной оболочке, при имплантации материалов с различным покрытием

На 9-е сутки наблюдения образец с покрытием TiO₂ представлял собой тонкий имплантат, полностью погружившийся в ткань ХАО без визуализации на поверхности. В зоне имплантации наблюдалась хорошо развитая, плотная сосудистая сеть с наличием крупных сосудов в непосредственной близости от места погружения. На 13-е сутки эмбриогенеза на всех восьми образцах наблюдалась плотная разветвленная сосудистая сеть с сохранением крупных сосудов. Результат эксперимента свидетельствовал о хорошей биосовместимости материала с покрытием TiO₂ (рис. 3).

Образец с покрытием TiNb значительной толщины и массы полностью погрузился в ХАО непосредственно после размещения и не удерживался на поверхности. На 9-е сутки в зоне имплантации фиксировалось наличие хорошо развитой сосудистой сети, однако крупные сосуды отсутствовали. Это указывало на отсутствие выраженного угнетающего влияния материала на формирование сосудов, демонстрируя его приемлемую первичную биосовместимость даже при быстром погружении из-за большой массы образца. Однако на 13-е сутки эмбриогенеза в зоне имплантации образца с покрытием TiNb наблюдалось практически полное отсутствие сосудистой сети, свидетельствующее об их необратимой регрессии. Сохранение сосудов отмечено лишь в одном эмбрионе.

Образец с покрытием TiNbO₂ на 9-е сутки был полностью погружен в ХАО. В зоне имплантации наблюдалась развитая сосудистая сеть, однако плотность и разветвленность сосудов были ме-

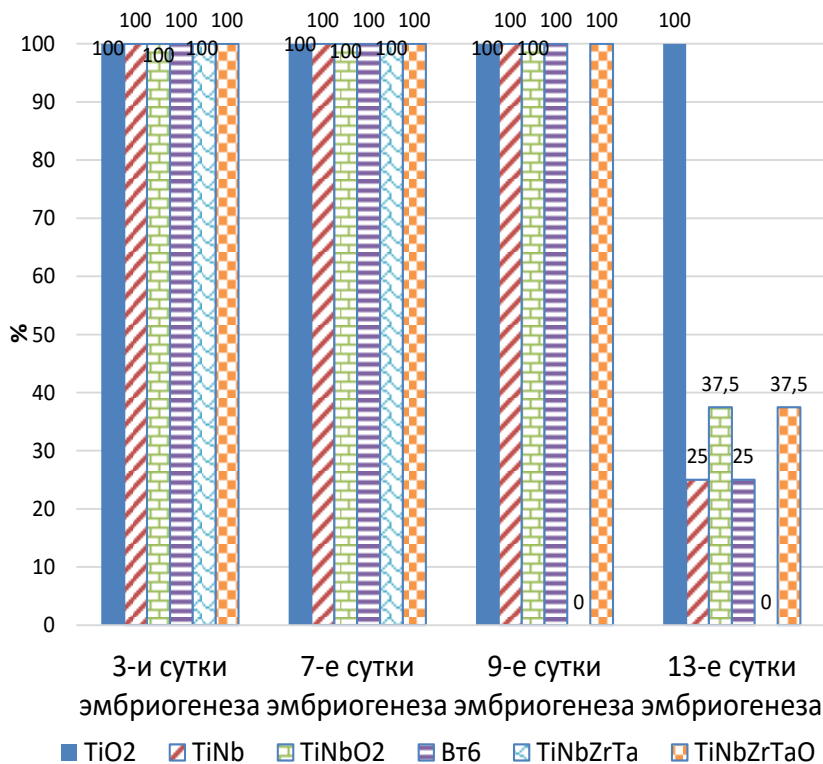
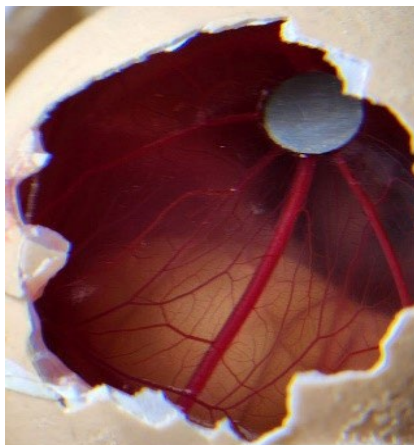


Рис. 1. Процент выживаемости эмбрионов при имплантации на хориоаллантаоисной оболочке разных образцов имплантатов



9-е сутки



13-е сутки

Рис. 3. Результаты имплантации образца с покрытием TiO_2 на хориоаллантаоисной оболочке куриного эмбриона

нее выражены, чем у образца с покрытием $TiNb$, крупные сосуды отсутствовали. На 13-е сутки в трёх эмбрионах из восьми наблюдалось полное исчезновение сосудистой сети в зоне имплантации. Сохранение сосудов отмечено лишь в трех случаях (рис. 4).



9-е сутки



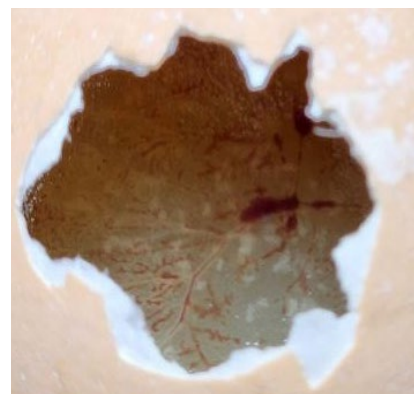
13-е сутки

Рис. 4. Результаты имплантации образца с покрытием $TiNbO_2$ на хориоаллантаоисной оболочке куриного эмбриона

Имплантат из сплава ВТ6 на 9-е сутки был полностью погружен в ХАО. В зоне имплантации наблюдалась разветвленная сеть мелких и крупных сосудов. Наблюдаемая картина была аналогична таковой для образца с покрытием TiO_2 , что свидетельствовало о хорошей первичной биосовместимости материала. На 13-е сутки эмбриогенеза в образце ВТ6 в шести эмбрионах из восьми произошло полное исчезновение сосудистой сети в зоне имплантации. Лишь в двух случаях наблюдались крупные сосуды и развитая капиллярная сеть.



9-е сутки



13-е сутки

Рис. 5. Результаты имплантации образца с покрытием $TiNbZrTa$ на хориоаллантаоисной оболочке куриного эмбриона

Образец с покрытием $TiNbZrTa$ также был полностью погружен в ХАО. При этом уже на 9-е сутки материал вызвал практически полное исчезновение сосудистой сети в зоне имплантации и прилегающих областях. Данный эффект развился после имплантации на изначально развитую сосудистую сеть, что говорит о потенциально низкой биологической совместимости материала с покрытием $TiNbZrTa$ (рис. 5).

Образец с покрытием $TiNbZrTaO$ на 9-е сутки полностью погружен в ХАО. В зоне имплантации сосудистая сеть хорошо развита, представлена разветвленной

сетью мелких сосудов и несколькими крупными сосудами. На 13-е сутки эмбриогенеза в образце с покрытием $TiNbZrTaO$ сосудистая сеть наблюдалась лишь в трех случаях из восьми, тогда как в остальных эмбрионах произошло полное исчезновение сосудов.

Микроскопический анализ хориоаллантаоисной мембраны показал различия в реакции сосудистой сети на имплантацию материалов различного состава. Образцы с покрытием TiO_2 и ВТ6 демонстрировали сохранение плотной разветвленной сосудистой сети и отсутствие признаков сосудистой деградации, что указывало на их высокую биосовместимость. В то же время сплавы $TiNb$, $TiNbO_2$ и $TiNbZrTaO$ вызвали снижение плотности сосудов, а материал $TiNbZrTa$ – полное исчезновение сосудистой сети уже на 9-е сутки, что показало их выраженную вазотоксичность и низкую биосовместимость.

Проведенное исследование на модели ХАО куриного эмбриона выявило значительную вариабельность ответа сосудистого русла в зависимости от химического состава имплантируемых материалов. Общая сохранность сосудистых структур составила $37,5 \pm 15,2$ %, однако разброс значений от 0 до 100 % в разных группах убедительно свидетельствует о том, что именно состав поверхности являлся определяющим фактором биосовместимости образцов.

Полная сохранность сосудов в образце с покрытием TiO_2 в некоторой степени контрастирует с результатами, полученными в работе S. Mudrakola и соавт., в которой показано, что наночастицы TiO_2 подавляли ангиогенез в ХАО [13]. Это расхождение, вероятно, объясняется разницей в физической форме материала и, как следствие, различными механизмами взаимодействия с клетками. Наночастицы могут легко проникать в клетки, вызывая оксидативный стресс, тогда как объемный материал служит хорошей основой для клеточной адгезии.

Образцы с покрытиями TiNb и $TiNbO_2$, а также сплав ВТ6 демонстрировали похожую двухфазную динамику: активное развитие сосудистой сети на ранних сроках (9-е сутки) сменялось регрессией сосудов к 13-м суткам. Таким образом, в нашем исследовании данные образцы покрытий демонстрировали отсроченное цитотоксическое действие.

Ранее в исследованиях сплавов TiNbZrTa подчеркивалось, что использование исключительно нетоксичных элементов является их основным преимуществом перед традиционными сплавами, содержащими ванадий и алюминий [14]. Наши данные, свидетельствующие о потенциальной токсичности покрытия из сплава TiNbZrTa, вступают в противоречие с данными других авторов. Так, в работе J. Cheng с соавт. при исследовании высокоэнтропийных сплавов

TiNbZrTa и TiNbZrTaMo сообщается, что скорость пролиферации фибробластов мыши в присутствии TiNbZrTa была равна нулю. Авторы интерпретировали это как показатель лучшей биосовместимости по сравнению с молибденсодержащим аналогом [15]. Указанное обстоятельство подчеркивает важность выбора чувствительных моделей *in vivo*, таких как ХАО, для выявления отсроченных токсических эффектов, неочевидных при стандартных тестах на цитотоксичность.

Оксидированный вариант данного сплава (TiNbZrTaO) показал принципиально иной результат. Наличие оксидного слоя отчасти нивелировало токсичность: на 9-е сутки сохранялась развитая сосудистая сеть с крупными сосудами. Хотя на 13-е сутки ее сохранность снизилась до 37,5 %, это состояние значительно лучше, чем полная гибель сосудов в образцах с покрытием TiNbZrTa. Таким образом, очевидна решающая роль поверхностной обработки в повышении биосовместимости сплавов [15].

Заключение. В результате проведенного исследования на модели хориоаллантоисной оболочки куриного эмбриона выявлено, что наиболее высокой биосовместимостью обладают образцы сплавов с покрытием TiO_2 и ВТ6. При этом полное сохранение структурной целостности сосудистой сети отмечено только у материала TiO_2 . Полученные результаты свидетельствуют о высокой безопасности для биологических объектов сплавов титана, циркония, ниобия, что обосновывает дальнейшее исследование этих материалов в условиях экспериментов *in vivo*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-69-00074, <https://rscf.ru/project/24-69-00074/>.

Литература/References

1. Yan R., Li J., Wu Q., Zhang X., Hu L. [et al.]. Trace Element-Augmented Titanium Implant With Targeted Angiogenesis and Enhanced Osseointegration in Osteoporotic Rats. *Front. Chem.* 2022;10:839062. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.839062>
2. Fernandes P. F., Grenho L., Fernandes M. H., Sampaio-Fernandes J. C., Gomes P. S. Microgap and bacterial microleakage during the osseointegration period: An in vitro assessment of the cover screw and healing abutment in a platform-switched implant system. *J. Prosthet. Dent.* 2023;130(1):87-95. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.07.030>
3. Huang Y. M., Huang C. C., Tsai P. I., Yang K. Y., Huang S. I. [et al.]. Three-Dimensional Printed Porous Titanium Screw with Bioactive Surface Modification for Bone – Tendon Healing: A Rabbit Animal Model. *Int. J. Mol. Sci.* 2020;21(10):3628. <https://doi.org/10.3390/ijms21103628>
4. Virnik S., Cueni L., Kloss-Brandstätter A. Is one-stage lateral sinus lift and implantation safe in severely atrophic maxillae? Results of a comparative pilot study. *Int. J. Implant. Dent.* 2023;9(1):6. <https://doi.org/10.1186/s40729-023-00471-5>
5. Breban-Schwarzkopf D., Chioibas R., Macasoi I., Bolintineanu S., Marcovici I. [et al.]. Comprehensive *in vitro* and *in ovo* assessment of cytotoxicity: Unraveling the impact of sodium fluoride, xylitol, and their synergistic associations in dental products. *Biomol. Biomed.* 2024;24(4):923-938. <https://doi.org/10.17305/bb.2024.10181>
6. Fernandes P. F., Grenho L., Fernandes M. H., Sampaio-Fernandes J. C., Gomes P. S. Microgap and bacterial microleakage during the osseointegration period: An in vitro assessment of the cover screw and healing abutment in a platform-switched implant system. *J. Prosthet. Dent.* 2023;130(1):87-95. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.07.030>
7. Rausch M. A., Shokoohi-Tabrizi H., Wehner C., Pippenger B. E., Wagner R. S. [et al.]. Impact of Implant Surface Material and Microscale Roughness on the Initial Attachment and Proliferation of Primary Human Gingival Fibroblasts. *Biology.* 2021;10:356. <https://doi.org/10.3390/biology10050356>
8. Prokopenko N. A., Petrikova E. A., Petyukevich M. S., Tolkachov O. S., Koval N. N. [et al.]. Structure and properties of titanium and titanium oxide films formed on a substrate by vacuum-arc plasma-assisted method. *Russ. Phys. J.* 2025;68:383-391. <https://doi.org/10.1007/s11182-025-03444-w>
9. Koval N. N., Prokopenko N. A., Petrikova E. A., Vorobyov M. S., Ivanov Yu. F. Determination by scratch testing of the quality of thin-film oxide coatings formed by vacuum-arc plasma-assisted method. *Russ. Phys. J.* 2025;68:392-399. <https://doi.org/10.1007/s11182-025-03445-9>
10. Vimalraj S., Renugaa S., Dhanasekaran A. Chick embryo chorioallantoic membrane: a biomaterial testing platform for tissue engineering applications. *Process Biochemistry.* 2022;124:81-91. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.11.007>
11. Skwira A., Szewczyk A., Barros J., Laranjeira M., Monteiro F. J. [et al.]. Biocompatible antibiotic-loaded

- mesoporous silica/bioglass/collagen-based scaffolds as bone drug delivery systems. *International Journal of Pharmaceutics*. 2023;645:123408. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2023.123408>.
12. Szuhanek C. A., Watz C. G., Avram Ş., Moacă E. A., Mihali C. V. [et al.]. Comparative Toxicological In Vitro and In Ovo Screening of Different Orthodontic Implants Currently Used in Dentistry. *Materials*. 2020;13(24):5690. <https://doi.org/10.3390/ma13245690>
13. Mudrakola S., Koopari C., Kande R., Rajkumar K., Anoor P. [et al.]. Synthesis and stabilization of anatase form of biomimetic TiO₂ nanoparticles for enhancing anti-tumor potential. *Green Processing and Synthesis*. 2024;13(1):20230182. <https://doi.org/10.1515/gps-2023-0182>
14. Hayyawi A. R., Al-Ethari H., Haleem A. H. Characterization of biomedical Ti-35Nb-5Ta-7Zr alloy prepared by powder metallurgy route. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2025;64(3):879-890. <https://doi.org/10.1080/00084433.2024.2395668>
15. Cheng J., Yang P., Chen Q., Long X., Chen G. [et al.]. Bio-corrosion behaviors and bio-compatibilities of TiNbZrTa and TiNbZrTaMo high entropy alloys. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024;32:2268-2278. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.08.083>

Поступила 31.10.2025

Сведения об авторах:

Долгалеv Александр Александрович, доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры стоматологии общей практики и детской стоматологии; тел.: +79624404861; e-mail: dolgalev@dolgalev.pro; <https://orcid.org/0000-0002-6352-6750>

Багдасарян Мария Сергеевна, старший лаборант кафедры детской хирургии с курсом ДПО; тел.: +79283265416; e-mail: pedsurg@stgmu.ru; <https://orcid.org/0009-0006-4199-0532>

Коваль Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник; тел.: +79138291684; e-mail: koval@hcei.tsc.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5339-7994>

Иванов Юрий Фёдорович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник; тел.: +79521634120; e-mail: yufi55@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

Воробьев Максим Сергеевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник; тел.: +79528056883; e-mail: vorobyovms@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5136-5905>

Хрипунова Алеся Александровна, кандидат медицинских наук, доцент, заведующая кафедрой информационных и цифровых технологий; тел.: +79614986072; e-mail: fkcz2007@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8734-4188>

Чониашвили Давид Зурабович, кандидат медицинских наук, доцент кафедры терапевтической, хирургической и детской стоматологии с курсом имплантологии, реконструктивной хирургии полости рта, детской челюстно-лицевой хирургии; тел.: +79188281172; e-mail: davidchoniashvili@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4218-1359>

Пархоменко Кристина Юрьевна, младший научный сотрудник; тел.: +79283419533; e-mail: parchoomenko@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0000-4244-5620>