



Сравнительные характеристики систем дентальных имплантатов в условиях импортозамещения

В.В. Лабис¹, И.В. Таболин¹, Э.А. Базикян¹, И.Г. Дьячкова^{2*}, Д.А. Золотов²,
В.Е. Асадчиков², О.М. Жигалина^{2,3}, Д.Н. Хмеленин², Е.А. Бейшер⁵, С.В. Сизова⁴,
В.А. Олейников⁴, В.А. Путь⁵, И.Г. Козлов⁵

¹Российский университет медицины, Москва, Российская Федерация

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Российская Федерация

³Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

⁴Институт биоорганической химии имени академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН,
Москва, Российская Федерация

⁵Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова,
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Целью исследования было проведение сравнительного анализа различных систем дентальных имплантатов, инициированного обнаруженной ранее свободной эмиссией и эмиссией под нагрузкой нано- и микроразмерных частиц с поверхностей дентальных имплантатов. Использование различных способов обработки поверхности при изготовлении сертифицированных медицинских изделий, а также сплавов на основе титана, не исключают возможность развития воспалительных осложнений в виде мукозита и периимплантита. Дезинтеграция дентальных имплантатов в отсроченном периоде времени, при свершившейся ранее успешной остеоинтеграции, делает необходимым поиск новых сплавов и покрытий, модифицирующих свойства медицинских изделий, а также проведение научных исследований по идентификации причин возникающих осложнений воспалительного генеза. **Материалы и методы.** В данной работе с помощью современных нанотехнологических методов исследования, таких как рентгеновская микротомография, рентгенофлуоресцентный анализ, растровая и просвечивающая электронная микроскопия, а также динамическое светорассеяние, была дана сравнительная характеристика стабильности окисного слоя шести систем дентальных имплантатов: Astra Tech (Австрия), Neobiotech (Корея), Nobel Replace (Швейцария), Alpha Bio (Израиль), Straumann (Швейцария) и Dental Synthesis (Россия). **Результаты.** Показано, что углеродное покрытие на поверхности дентальных имплантатов отечественной системы Dental Synthesis, разработанное для сдерживания эмиссии металлических наночастиц, является эффективным при механической нагрузке. **Заключение.** Проведенное исследование позволило оценить и интерпретировать, в условиях лаборатории, отдаленные результаты дальнейшего применения сертифицированных медицинских изделий в клинике.

Ключевые слова: дентальные имплантаты, наноразмерные частицы, микроразмерные частицы, эмиссия частиц, углеродное покрытие

Для цитирования: Лабис ВВ, Таболин ИВ, Базикян ЭА, Дьячкова ИГ, Золотов ДА, Асадчиков ВЕ, Жигалина ОМ, Хмеленин ДН, Бейшер ЕА, Сизова СВ, Олейников ВА, Путь ВА, Козлов ИГ. Сравнительные характеристики систем дентальных имплантатов в условиях импортозамещения. *Пародонтология*. 2026;31(1):31-43. <https://doi.org/10.33925/1683-3759-2026-1175>

***Автор, ответственный за связь с редакцией:** Дьячкова Ирина Геннадьевна, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 119333, Ленинский просп., д. 59, г. Москва, Российская Федерация. Для переписки: sig74@mail.ru

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Благодарности: Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» (в части рентгеновских и электронно-микроскопических исследований). Электронно-микроскопические исследования были проведены с использованием оборудования ЦКП Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники. Индивидуальные благодарности для декларирования отсутствуют.

Comparative evaluation of dental implant systems in the context of import substitution

V.V. Labis¹, I.V. Tabolin¹, E.A. Bazikyan¹, I.G. Dyachkova^{2*}, D.A. Zolotov²,
V.E. Asadchikov², O.M. Zhigalina^{2, 3}, D.N. Khmelenin², E.A. Beisher³,
S.V. Sizova⁴, V.A. Oleinikov⁴, V.A. Put⁵, I.G. Kozlov⁵

¹Russian University of Medicine, Moscow, Russian Federation

²National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation

³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

⁴Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

⁵I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Relevance. This study aimed to compare different dental implant systems in light of previously reported spontaneous and load-induced release of nano- and microparticles from implant surfaces. Despite the use of various surface treatment methods and titanium-based alloys in the manufacture of certified medical devices, inflammatory complications such as peri-implant mucositis and peri-implantitis may still occur. In addition, delayed degradation of the implant surface may occur even after successful osseointegration. These findings underscore the need to develop improved alloys and surface coatings and to further investigate the causes of inflammatory complications associated with dental implants. **Materials and methods.** The stability of the surface oxide layer was evaluated in six dental implant systems: Astra Tech (Austria), Neobiotech (Korea), Nobel Replace (Switzerland), Alpha Bio (Israel), Straumann (Switzerland), and Dental Synthesis (Russia). The analysis was performed using advanced techniques, including X-ray microtomography, X-ray fluorescence analysis, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, and dynamic light scattering. **Results.** The carbon coating applied to domestically manufactured Dental Synthesis implants to reduce metallic nanoparticle release remained effective under mechanical loading. **Conclusion.** This laboratory study provided a basis for further investigation of the long-term clinical performance of these dental implant systems.

Keywords: dental implants, nanoparticles, microparticles, particle release, carbon coating

For citation: Labis V.V., Tabolin I.V., Bazikyan E.A., Dyachkova I.G., Zolotov D.A., Asadchikov V.E., Zhigalina O.M., Khmelenin D.N., Beisher E.A., Sizova S.V., Oleinikov V.A., Put V.A., Kozlov I.G. Comparative evaluation of dental implant systems in the context of import substitution. *Parodontologiya*. 2026;32(1):31-43. (In Russ.).<https://doi.org/10.33925/1683-3759-2026-1175>

***Corresponding author:** Dyachkova Irina, National Research Centre "Kurchatov Institute", 119333, Leninskiy Prospekt, 59, Moscow, Russian Federation. For correspondence: sig74@mail.ru

Conflict of interests: The authors declare no conflict of interests.

Acknowledgments: The X-ray and electron microscopy studies were carried out within the framework of the state assignment of the National Research Center Kurchatov Institute. Electron microscopy was performed using the equipment of the Shared Research Center "Structural Diagnostics of Materials" of the Kurchatov Complex for Crystallography and Photonics.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день во всем мире продолжается изучение влияния нано- и микрочастиц металлов на организм человека [1–3].

Несмотря на существование различных способов очистки поверхностей медицинских изделий и разработки новых покрытий, нельзя исключить развитие таких воспалительных осложнений как мукозит и периимплантит, приводящих в последующем к дезинтеграции дентальных имплантатов.

Продолжаются экспериментальные исследования в условиях лаборатории, посвященные изучению чистоты поверхности изделий при применении разных способов обработки поверхностей металлических структур, разработка новых антибактериальных покрытий [4, 5].

Причины дезинтеграций медицинских изделий, изготовленных на основе сплава титана при успешной остеоинтеграции, в основном рассматриваются

с позиции механической перегрузки или бактериального фактора [6, 7].

Ранее была доказана свободная эмиссия и эмиссия под механической нагрузкой наноразмерных металлических частиц (НРМЧ), с поверхности разных систем дентальных имплантатов и других металлических изделий. Полученные результаты пилотных исследований стали основанием к проведению сравнительного анализа стабильности окисного слоя шести систем сертифицированных медицинских изделий и их состава, в условиях импортозамещения [8].

Исходя из ранее проведенных исследований, мы предполагаем, что эмиссия наноразмерных металлических частиц при взаимодействии с белками крови образует комплексы, которые являются основой для распознавания и накопления в иммунокомпетентных клетках с их последующей агрегацией под механической нагрузкой в тканях костного ложа. Такое накопление может провоцировать раннюю клеточную гибель, запуская тем самым хрониче-

ческое аутовоспаление, усугубляемое возможностью проникновения бактерий из полости рта с последующим формированием биопленок [9].

С целью сдерживания эмиссии нано- и микрочастиц, под воздействием механической нагрузки, в нашей стране была разработана отечественная система дентальных имплантатов с углеродным покрытием (Рубштейн АП, Владимиров АБ, Плотников СА, Пушкарь СС, авторы; ФГБУН Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, патентообладатель. Способ изготовления внутрикостного стоматологического имплантата с углеродным нанопокрыванием. Патент RU2571559C1 Российская Федерация. Опубликовано 20.12.2015).

Актуальным является изучение свободной эмиссии нано- и микроразмерных частиц и имитация механической нагрузки, с использованием запатентованного способа получения супернатантов с поверхности разных систем дентальных имплантатов. Сравнительный анализ, проведенный с использованием физических и клинических методов исследований, по изучению стабильности окисного слоя сертифицированных медицинских изделий, представлен ниже.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы исследования

Исследовались новые дентальные имплантаты шести различных систем производителей: Astra Tech (part of Dentsply Sirona, США, Австрия), Neobiotech (Neobiotech Co., Ltd., Сеул, Республика Корея), Nobel Replace (Kloten, canton of Zürich, Швейцария), Alpha Bio (Alpha-Bio Tec Ltd., Petach Tikva, Израиль), Straumann (Straumann Holding AG Peter Merian-Weg 12 4002 Basel Швейцария) и Dental Synthesis (Синтез Про, система дентальных имплантатов с углеродным покрытием, Россия). Исследования проводились как на клинической базе кафедры ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России, так и в коллаборации с другими научными учреждениями: Институт биоорганической химии имени академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН; Отделение «Институт кристаллографии имени А. В. Шубникова» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт»; Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова Министерства здравоохранения РФ.

Для проведения рентгеновских исследований на кафедре хирургической стоматологии и имплантологии НОИ непрерывного профессионального образования имени Н. Д. Ющука ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России, проводили забор мягкотканых биоптатов на этапах хирургических ревизий. Данный забор биоптатов осуществлялся до удаления несостоятельных дентальных имплантатов с целью последующего изучения причин дезинтеграции.

В условиях ламинара, способом, описанным в патенте (Базикян ЭА, Лабис ВВ, Козлов ИГ, Хайдуков СВ, Лабис ЮВ, авторы и патентообладатели. Способ персонифицированного подбора дентального имплантата на основе сплавов оксида титана. Патент RU2611013C Российская Федерация. Опубликовано 17.02.2017), были получены супернатанты с поверхностей 30 единиц дентальных имплантатов шести систем производителей как при свободной эмиссии наночастиц, так и при имитации нагрузки. Проведены измерения нано- и микрочастиц методом динамического светорассеяния (ДСР), сформированы шесть концентратов, и осуществлена визуализация частиц и поверхностей дентальных имплантатов в растровом и просвечивающем электронных микроскопах (РЭМ, ПЭМ).

Рентгеновская микротомография

Для выявления инородных включений в биологических тканях биоптатов, импрегнированных с поверхности окисного слоя медицинских сертифицированных изделий и для определения их расположения, размера и коэффициента поглощения, использовался метод рентгеновской абсорбционной микротомографии.

Томографические исследования образцов проводились на рентгеновском микротомографе «ТОМАС» [10]. В данных измерениях использовался кристалл-монокроматор из пиролитического графита (размер пучка на объекте около 2 см). Использование монохроматического излучения позволяет проводить измерения реального значения линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения, что важно при исследовании элементного состава образцов. Измерения проводились с применением рентгеновской трубки с молибденовым анодом (энергия 17.5 кэВ). При использовании этой энергии биологическая ткань (мягкотканый биоптат грануляционной ткани костного ложа челюстей) с одной стороны является достаточно прозрачной для сохранения высокого соотношения «сигнал – шум» на изображениях, а с другой – хорошо видны границы сильно поглощающих включений внутри этой ткани.

Геометрия проведенных экспериментов была следующая: расстояние источник – образец – 1,2 м, расстояние образец – детектор – 0,02 м. При такой геометрии эксперимента расходимость излучения пренебрежимо мала, что важно для анализа изображений. Условия зондирования: ускоряющее напряжение – 40 кВ, ток – 40 мА. Для проведения томографических исследований производилось вращение образцов относительно фиксированной вертикальной оси, при этом измерялось 400 проекций с шагом 0,5 градуса и экспозицией 4 секунды на кадр. При проведении измерений использовался высокоразрешающий рентгеновский детектор XIMEA-xiRay11 (XIMEA, Словакия). Этот детектор позволяет получать изображения с разрешением 9 мкм при поле зрения 36 × 24 мм.

Реконструкция для случая с сильно поглощающими включениями проводилась алгебраическим ме-

тодом, что позволило уменьшить как выраженность «лучевых» артефактов на восстановленных изображениях, так и дисперсию восстанавливаемого значения линейного коэффициента поглощения.

Для характеристики содержащихся в образцах микровключений была применена следующая процедура обработки полученных 3D-изображений. На первом этапе, с целью выделения границ микровключений, применялась пороговая фильтрация. При этом величина порога подбиралась вручную на основе анализа коэффициента поглощения мягких тканей по всему объекту исследования. Далее по полученным бинаризованным данным была выполнена процедура маркирования (labeling). Применение такой процедуры (сегментации) для всех томографических сечений позволило выделить и проанализировать отдельные поглощающие микровключения, а также определить их геометрические размеры (эквивалентный диаметр).

Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА)

Элементный состав мягкотканых биоптатов определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа на рентгеновском микротомографе с использованием детектора-спектрометра X-123SDD (Amptek, США). Источником излучения являлись рентгеновские трубки с медным (размер фокуса $12 \times 2,0$ мм, энергия 8,047 кэВ), молибденовым (размер фокуса $12 \times 0,4$ мм, энергия 17,47 кэВ) или серебряным (размер фокуса $10 \times 1,0$ мм, энергия 22,162 кэВ) анодом. Условия зондирования: ускоряющее напряжение – 40 кВ, ток – 40 мА. Излучение монохроматизировалось при помощи однократного отражения от высокосовершенного симметричного кристалла кремния, ориентацией (111). Нижний предел измерений ограничен параметрами чувствительного элемента детектора и составлял ~1 кэВ. Энергетическое разрешение снятых от исследуемого образца спектров флуоресцентного излучения составило ~150 эВ. Геометрия проведенных экспериментов была следующая: расстояние источник – образец около 1 м, расстояние образец – детектор около 0,02 м, экспозиция – 600 секунд.

Методы растровой (РЭМ) и просвечивающей (ПЭМ) электронной микроскопии с энергодисперсионным (ЭД) анализом

РЭМ-исследования качества поверхности дентальных имплантатов проводились с помощью растрового электронного микроскопа Scios Dual Beam (Thermofisher Scientific, США) при ускоряющем напряжении 20 кВ в режиме вторичных электронов с использованием детектора вторичных электронов Everhart-Thornley. Образцы закрепляли в держателе с помощью углеродной проводящей ленты.

Для наблюдения металлографических микроструктур методом РЭМ проводилась специальная подготовка образцов. Для исследования качества покрытия имплантатов и визуализации их структуры под покрытием были получены шлифы поперечных сече-

ний, которые готовили в несколько этапов: заливка имплантата смолой, резка, механическая шлифовка, ионная полировка. Резка имплантата осуществлялась с помощью универсальной системы прецизионной резки Leica EM TXP. Интегрированный стереомикроскоп с масштабной сеткой и регулировка угла наклона держателя образцов до 60° (по отношению к оси вращения фрезы) обеспечивали полный визуальный контроль процесса резки и механической шлифовки поверхности образца. Механическая шлифовка проводилась с использованием шлифовальных дисков при последовательном уменьшении размера частиц абразива от 15 до 0,5 мкм. Традиционная механическая подготовка образца может приводить к появлению дополнительных повреждений, дефектов, искажающих истинную структуру поверхности. Чтобы избежать таких артефактов и улучшить контраст на РЭМ изображениях на последнем этапе использовался метод ионного травления поверхности образца в установке Hitachi IM4000 plus, которая позволяет осуществить травление поверхности образца широким пучком ионов Ar^+ с энергией до 6 кВ, легко устраняет дефекты резки, обеспечивает получение неискаженных поперечных сечений большой площади (до 5 мм^2) без приложения механического напряжения к образцу. Получение качественной поверхности образца большой площади для РЭМ-исследований обеспечивается следующим образом. Так как ионный пучок имеет профиль плотности тока гауссовой формы, то, когда центр ионного пучка, падающего на поверхность, совпадает с центром вращения образца, центральная область материала образца травится с большей скоростью, чем соседние участки его поверхности. В установке Hitachi IM4000 plus положения центров вращения и качания образца изменяются относительно центра ионного пучка, следовательно, в процессе травления обрабатывается большая площадь с повышенной однородностью.

ПЭМ-изображения получены с помощью просвечивающего электронного микроскопа с полевой эмиссией FEI Osiris при ускоряющем напряжении 200 кВ. Просвечивающий электронный микроскоп оборудован специальной системой детекторов, позволяющих получать карты распределения химических элементов большой площади за несколько минут. Для исследований на просвет приготовленные специальным образом (Базикян ЭА, Лабис ВВ, Козлов ИГ, Хайдуков СВ, Лабис ЮВ, авторы и патентообладатели. Способ персонифицированного подбора дентального имплантата на основе сплавов оксида титана. Патент RU2611013С Российская Федерация. Опубликовано 17.02.2017) супернатанты с наноразмерными частицами, полученными с поверхности дентальных имплантатов, наносили на медные сетки с тонкой подложкой из аморфного углерода.

Динамическое светорассеяние (ДСР)

Метод динамического светорассеяния (фотон-корреляционное или квазиупругое рассеяние света) ис-

пользуется для измерения объектов размером от 1 до 1000 нм, что позволяет зафиксировать выход НРМЧ из объектов исследования. Сертифицированные медицинские изделия, в частности дентальные имплантаты, подвергались погружению в бидистиллят в условиях ламинара, затем устанавливались в CO₂ инкубатор, где были получены супернатанты, содержащие НРМЧ при свободной эмиссии частиц в стерильный раствор (Базикян ЭА, Лабис ВВ, Козлов ИГ, Хайдуков СВ, Лабис ЮВ, авторы и патентообладатели. Способ персонализированного подбора дентального имплантата на основе сплавов оксида титана. Патент RU2611013С Российская Федерация. Опубликовано 17.02.2017). В дальнейшем супернатанты, содержащие дентальные имплантаты, подвергались ультразвуковому воздействию с частотой 35 кГц с разными временными интервалами, что являлось имитацией *in vitro* условий физиологического погружения дентальных имплантатов в костную ткань и воспроизведения физической нагрузки в лабораторных условиях. В результате проведенных экспериментальных исследований в условиях *in vitro* были получены супернатанты с дентальных имплантатов шести исследуемых систем, при свободной эмиссии частиц, а также при воздействии ультразвуком частотой 35 кГц в течение 5, 10 и 20 минут соответственно. В качестве контроля для изучения каждой системы в экспериментах использовались по две пробирки с бидистиллированной водой.

Для выявления наноразмерных частиц в полученных супернатантах и определения их размера проводили исследования на приборе фирмы 90 Plus Partical Size Analyzer (Brookhaven Instruments Corporation, США) в мультимодальном режиме с использованием автоматической функции 90Plus/BI-MAS, а также функции dust cut-off, позволяющей удалять из учитываемых наноразмерных частиц очень крупные объекты, в частности пыль. При этом значение фильтра составляло 20. Методом динамического светорассеяния измерялись три параметра: диаметр НРМЧ (D, нм), частота встречаемости НРМЧ в составе супернатантов (ACR, kcps) и полидисперсность НРМЧ в составе супернатантов (PD, %).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены результаты рентгеновских исследований образцов мягкотканых биоптатов, взятых из полости рта пациентов в области ранее установленных дентальных имплантатов пяти систем производителей, за исключением новой российской системы дентальных имплантатов Dental Synthesis, по которой отсутствуют долгосрочные клинические наблюдения. В таблице 1 приведены оцененные в ходе анализа полученных трехмерных реконструкций количественные параметры: размеры (эквивалентный диаметр, объем) и средние коэффициенты поглоще-

Таблица 1. Количественные параметры микровключений (источник: составлено авторами)

Table 1. Quantitative parameters of microscopic inclusions (Sources: compiled by the author)

Значения Values	Объем, мкм ³ Volume, μm ³	Диаметр, мкм Diameter, μm	Коэффициент поглощения (μ), мм ⁻¹ Absorption coefficient (μ), mm ⁻¹	Химические элементы Chemical elements
Astra Tech				
Мин. / min	8019	24.83	0.17	Ti
Макс / max	5.18 × 10 ⁷	462.53	1.76	
Сред / mean	0.515 × 10 ⁶	42.84	0.20	
Neobiotech				
Мин. / min	8019	24.83	0.17	Ti, V
Макс / max	1.18 × 10 ⁸	610.1	6.74	
Сред / mean	0.85 × 10 ⁶	54.12	0.21	
Nobel Replace				
Мин. / min	729	11.1	0.22	Al, Ti, V
Макс / max	6.8 × 10 ⁶	235.4	3.134	
Сред / mean	0.19 × 10 ⁶	51.6	0.26	
Alpha Bio				
Мин. / min	8748	25.56	0.185	Ti
Макс / max	3.79 × 10 ⁶	193.46	3.27	
Сред / mean	0.42 × 10 ⁶	46.65	0.23	
Straumann				
Мин. / min	15309	30.8	0.21	Al, Zr, Ti
Макс / max	10.504 × 10 ⁶	271.71	1.75	
Сред / mean	0.051 × 10 ⁶	49.25	0.27	

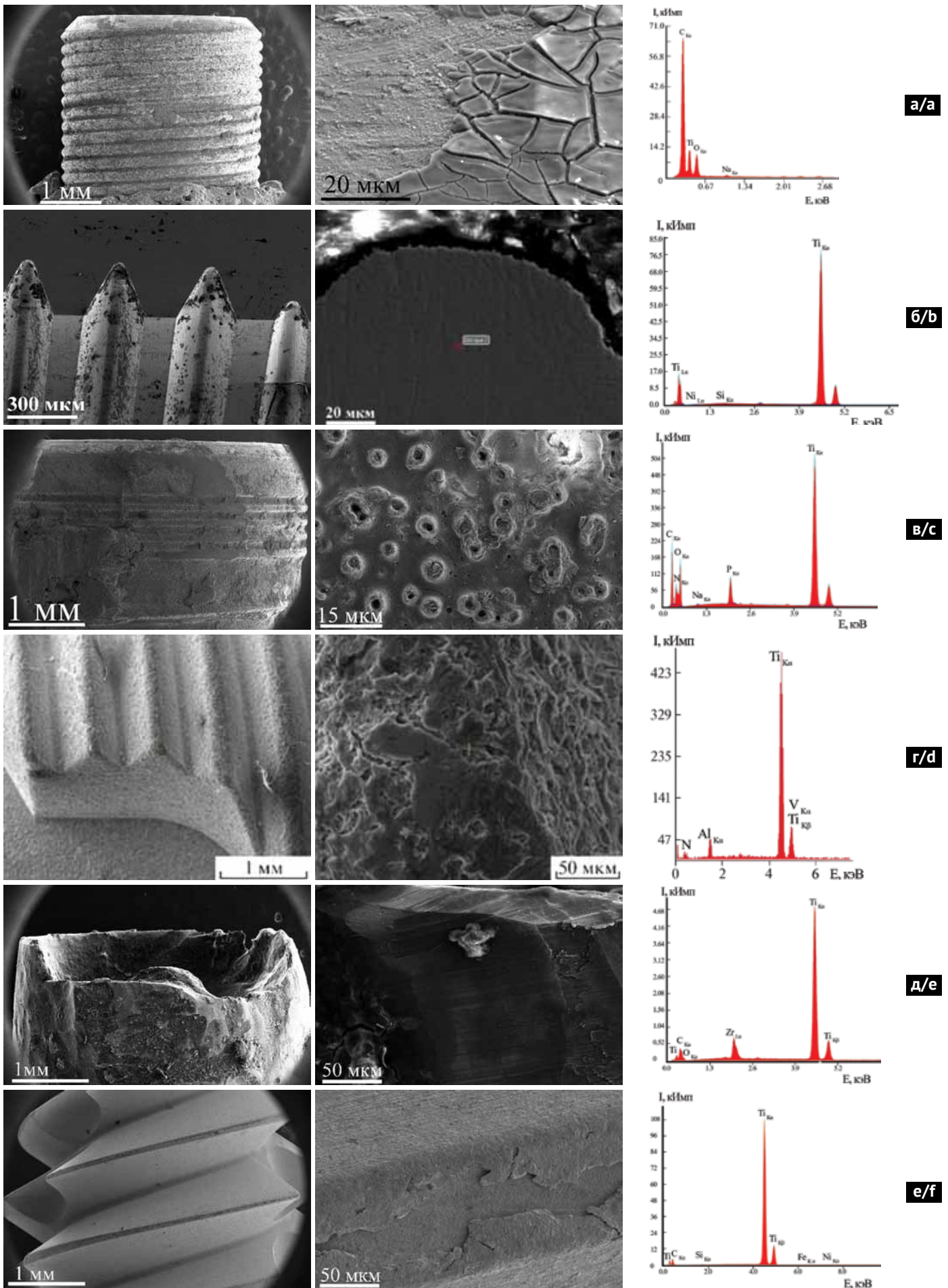


Рис. 2. РЭМ-изображения поверхности имплантатов с энергодисперсионным анализом для систем: а) Astra Tech; б) Neobiotech; в) Nobel Replace; г) Alpha Bio; д) Straumann; е) Dental Synthesis. Слева – общий вид и увеличенное изображение области снятия ЭД-спектра; справа – энергодисперсионные спектры (источник: составлено авторами)

Fig. 2. STEM images of implant surfaces and corresponding energy-dispersive spectra for the following systems: (a) Astra Tech; (b) Neobiotech; (c) Nobel Replace; (d) Alpha Bio; (e) Straumann; and (f) Dental Synthesis. Left: overview image and enlarged view of the area selected for EDS analysis. Right: energy-dispersive spectra (Sources: compiled by the author)

ния, обнаруженных инородных включений в биологических тканях. Также в таблице 1 приведены химические элементы, обнаруженные в биоптатах при расшифровке рентгенофлуоресцентных спектров, соотносящиеся с составом, заявленным производителем дентальных имплантатов исследуемых систем.

Во всех исследуемых образцах мягкотканых биоптатов обнаружены небольшие, от 11 мкм (предел разрешения) до 610 мкм, сильно поглощающие включения с типичным для металла контрастом и ярко выраженными «лучевыми» артефактами. Максимальный коэффициент поглощения обнаруженных в биоптатах инородных включений составил значений $6,74 \text{ мм}^{-1}$. Расшифровка полученных рентгенофлуоресцентных спектров выявила, помимо прочих, наличие во всех исследуемых образцах таких элементов как Ti, V, Al или Zr. Установлено соответствие обнаруженных в исследуемых образцах элементов, а именно Ti, V, Al и Zr, составу сплава титана, применяемого при изготовлении дентальных

имплантатов тем или иным производителем. Наличие микроэлементов металлов в составе мягких тканей, окружающих дентальные имплантаты, может быть только следствием их внедрения и механической нагрузки на остеоинтегрируемые имплантаты.

В работе также были изучены поверхность и структура дентальных имплантатов шести исследуемых систем, включая российскую систему с углеродным покрытием, а также морфология и элементный состав эмитированных наночастиц с их поверхностей. На рисунке 2 представлены РЭМ-изображения и соответствующие энергодисперсионные (ЭД) спектры, полученные от дентальных имплантатов исследуемых систем.

Отметим, что все исследуемые системы демонстрируют соответствие состава, заявленного производителем.

РЭМ-исследования поверхности образцов различных систем дентальных имплантатов показали наличие разнообразных дефектов, таких как микротрещины, поверхностный рельеф, нарушение сплошности покрытия, микроямки. Так, для систе-

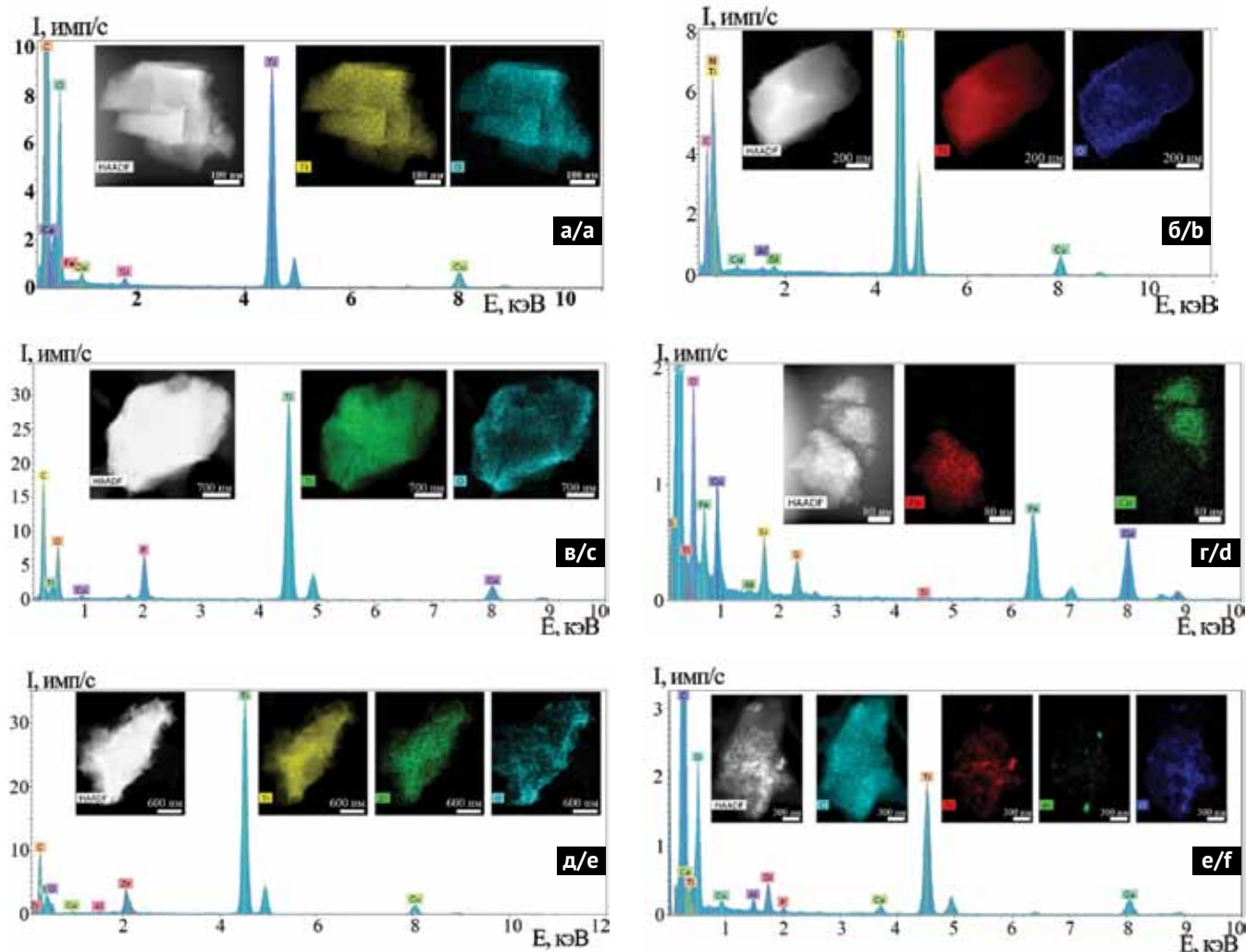


Рис. 3. ПРЭМ-изображения наночастиц, полученных в составе супернатантов с поверхностей шести систем дентальных имплантатов, с картами распределения химических элементов для систем: а) Astra Tech; б) Neobiotech; в) Nobel Replace; г) Alpha Bio; д) Straumann; е) Dental Synthesis (источник: составлено авторами)

Fig. 3. STEM images of nanoparticles identified in supernatants collected from the surfaces of six dental implant systems, with elemental distribution maps for the tested systems: а) Astra Tech; б) Neobiotech; в) Nobel Replace; д) Alpha Bio; е) Straumann; ф) Dental Synthesis (Sources: compiled by the author)

Таблица 2. Химические элементы, обнаруженные в составе частиц в растворах супернатантов методами ПРЭМ и энергодисперсионного картирования (источник: составлено авторами)

Table 2. Chemical elements detected in particles present in supernatants by STEM and energy-dispersive elemental mapping (Sources: compiled by the author)

Система/Элемент / System/Element	Ti	O	C	Al	Zr	Fe	Si	Ca	Cu
Astra Tech	▲	▲	▲	▲					
Neobiotech	▲	▲		▲		▲	▲	▲	
Nobel Replace	▲	▲		▲	▲	▲			
Alpha Bio	▲	▲				▲		▲	▲
Straumann	▲	▲		▲	▲				
Dental Synthesis	▲	▲	▲	▲					

мы Astra Tech характерно нарушение сплошности покрытия, растрескивание углеродного слоя, расположенного на поверхности имплантата (рис. 2а). На поверхности системы Neobiotech наблюдаются бугорки высотой 2-3 мкм, а у системы Nobel Replace на достаточно гладкой поверхности имплантата создан характерный рельеф с микроямками диаметром до 5 мкм. Систему Alpha Bio отличает неровная поверхность с возможностью отслоения отдельных чешуек при систематических нагрузках. Нарушения сплошности покрытия, особенно около острых кромок, наблюдали у системы Dental Synthesis.

Результаты исследования металлических наночастиц, полученных в составе супернатантов при свободной эмиссии и при имитации механической нагрузки методом ПРЭМ с ЭД анализом, представлены на рисунке 3.

В целом в растворе супернатантов методами ПЭМ и ПРЭМ наблюдали металлсодержащие частицы размером от 100 нм до 3 мкм. В большинстве случаев это были частицы оксида титана, которые имели преимущественно произвольную форму с острыми кромками (например, Astra Tech) или неровными краями (система Straumann), однако некоторые из них обнаруживали явно выраженную огранку (система Neobiotech) или просто округлую форму. Помимо оксидов титана могут встречаться частицы Fe или его оксидов, а также частицы, содержащие Al, Zr, Si, Ca, очень редко – Ni, Ag, Cu. Общие результаты по всем системам изученных растворов супернатантов представлены в таблице 2.

Наибольшее разнообразие частиц по элементному составу у системы Neobiotech, что ожидаемо, учитывая морфологию поверхности. В системах Dental Synthesis, Straumann и Astra Tech элементный состав частиц в растворе супернатантов соответствует составу сплавов и вероятность эмиссии снижена.

На рис. 4, 5 представлены результаты динамического светорассеяния при изучении супернатантов (Лабис ВВ, Сизова СВ, Базилян ЭА, Жигалина ОМ, Хайдуков СВ, Козлов ИГ, авторы; Лабис ВВ, Созова СВ, патентобладатели. Способ оценки стабильности окисного слоя поверхности дентального имплантата Патент RU2795653С1 Российская Федерация. Опубликовано 05.05.2023), полученных с поверхности окисного слоя дентальных имплантатов

шести систем производителей при свободной эмиссии наночастиц и при имитации механической нагрузки. Приведены два параметра наночастиц в составе супернатантов: диаметр частиц (нм) (рис. 4) и частота встречаемости частиц ACR (кcps) (рис. 5), а третий параметр – полидисперсность, в качестве изучаемого параметра не учитывается при оценке стабильности окисного слоя сертифицированных медицинских изделий, что было доказано ранее [8].

В результате проведенных исследований, на значительной выборке объектов для изучения, видны тенденции по отличию как диаметра наночастиц между системами дентальных имплантатов, так и динамики изменения частоты встречаемости наночастиц окисного слоя при имитации механической нагрузки. При оценке значимости характеристик наночастиц в патогенезе развития хронического аутовоспаления в костном ложе в первую очередь уделяется внимание размеру частиц при сравнительном анализе дентальных имплантатов разных систем производителей. Так, для системы Neobiotech можно отметить отрицательную динамику размера наночастиц при эмиссии под нагрузкой. С точки зрения частоты встречаемости наночастиц при увеличении механической нагрузки стоит отметить две системы с отрицательной динамикой данных параметров: Dental Synthesis и Neobiotech. Важно отметить, что изначально углеродное покрытие на поверхности дентальных имплантатов системы Dental Synthesis было разработано для сдерживания эмиссии металлических наночастиц. Размер наночастиц в составе супернатантов и их элементный состав, показанный с помощью просвечивающей электронной микроскопии и элементного анализа, указывает на эффективность данного покрытия по сдерживанию металлических наночастиц при механической нагрузке до определенного времени, что в отличие от других систем дентальных имплантатов позволяет отсрочить накопление НРМЧ в костном ложе.

Эмиссия наночастиц в костное ложе, как при внедрении дентальных имплантатов, так и при их функционировании в качестве опор для ортопедических конструкций, увеличивается со временем, что доказано ранее [8]. При сравнительном анализе результатов просвечивающей и растровой электронной ми-

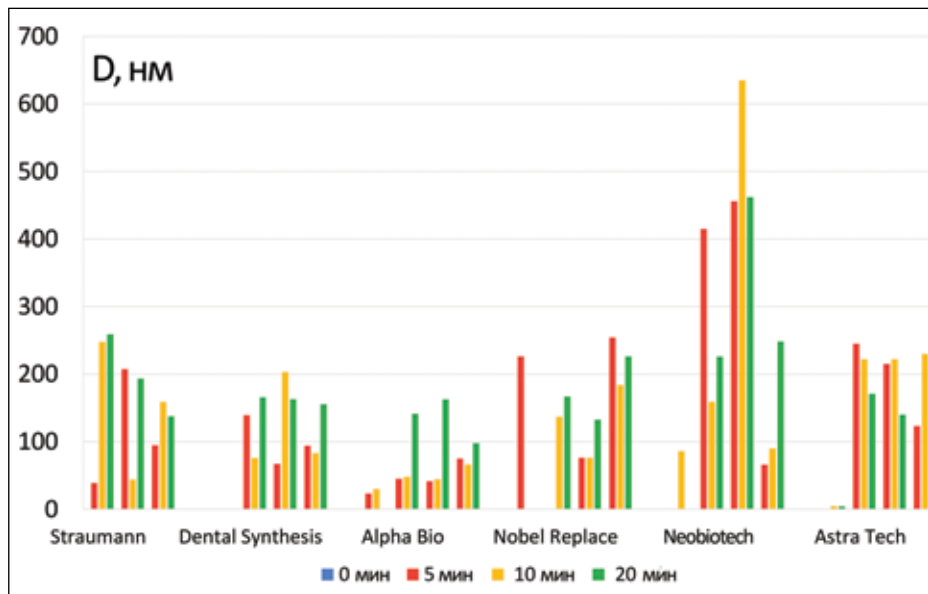


Рис. 4. Сравнительный анализ размера НРМЧ в составе супернатантов шести систем производителей при свободной эмиссии наночастиц и при имитации механической нагрузки ультразвуковым воздействием частотой 35 кГц (источник: составлено авторами)
Fig. 4. Comparative analysis of nano- and microparticle size in supernatants from six dental implant systems under spontaneous release and simulated mechanical loading induced by 35 kHz ultrasonic exposure (Sources: compiled by the author)

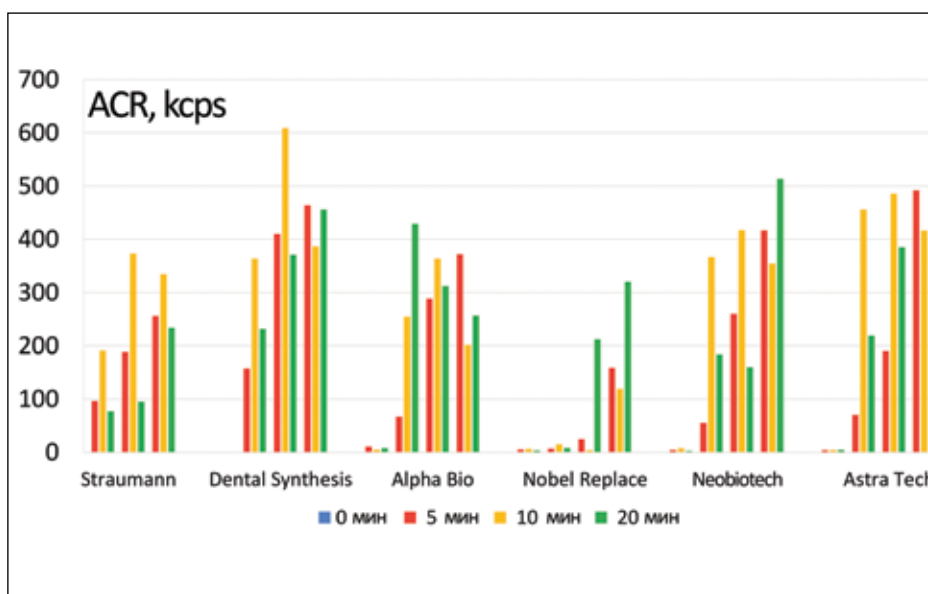


Рис. 5. Сравнительный анализ частоты встречаемости НРМЧ в составе супернатантов шести систем производителей при свободной эмиссии наночастиц и при имитации механической нагрузки ультразвуковым воздействием частотой 35 кГц (источник: составлено авторами)
Fig. 5. Comparative analysis of the detection frequency of nano- and microparticles in supernatants from six dental implant systems under spontaneous release and simulated mechanical loading induced by 35 kHz ultrasonic exposure (Sources: compiled by the author)

кроскопии важно отметить, что элементный состав наночастиц и составы сплавов и покрытий, используемых производителями, имеют отличия, что является обоснованием их качества и стоимости. Отдаленные результаты функционирования дентальных имплантатов в качестве опор для ортопедических конструкций, показаны при исследовании биоптатов рентгеновскими методами. При проведении хирургических ревизий и заборе мягкотканых биоптатов у пациентов с периимплантитом определяются микрочастицы окисного слоя у всех систем, подвергавшихся изучению. Накопительный эффект наночастиц и формирование их комплексов, участвующих в хроническом аутовоспалительном процессе, подтверждается наличием в мягкотканых биоптатах металлических частиц диаметром, достигающим до сотен микрометров, и элементным составом, соответствующим супернатантам, содержащим НРМЧ, полученным с поверхностей дентальных имплантатов. Необходимо отметить, что окисная пленка по элементному составу значительно вариабельней, чем сплав самих медицинских сертифицированных изделий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа указывает на необходимость разработки новых способов стабилизации эмиссии наночастиц с поверхностей сертифицированных медицинских изделий или поиска новых сплавов и биоинженерных конструкций, позволяющих снизить образования окисной пленки под нагрузкой. Необходимо отметить второстепенную роль бактериальных пленок, рост которых наряду с накопительным эффектом наночастиц в костном ложе функционирующего дентального имплантата становится не столь значимым в патогенезе развития мукозита. Клиническая симптоматика острого воспалительного процесса в виде мукозита является, скорее, вторичным проявлением уже имеющегося аутовоспаления в костном ложе. Следовательно, становится очевидным необходимость разработки новых протоколов профилактики и лечения мукозита и периимплантита, создание тест-систем, позволяющих диагностировать возникновение аутовоспаления в костном ложе до проявления клинических признаков мукозита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Li L, Sun W, Yu J, Lei W, Zeng H, Shi B. Effects of titanium dioxide microparticles and nanoparticles on cytoskeletal organization, cell adhesion, migration, and proliferation in human gingival fibroblasts in the presence of lipopolysaccharide. *J Periodontol Res*. 2022;57(3):644-659.
<https://doi.org/10.1111/jre.12993>
- Dhein J, Haller C, Reichl F-X, Milz S, Hickel R, Kollmuss M, Hoegg C. Intranuclear cell uptake and toxicity of titanium dioxide and zirconia particles as well as bacterial adhesion on dental titanium- and zirconia-implants. *Dent Mater*. 2022;38(3):517-528
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.12.142>
- Vodyanov V. The Role of Endogenous Metal Nanoparticles in Biological Systems. *Biomolecules*. 2021;11(11):1574.
<https://doi.org/10.3390/biom11111574>
- Nakajima K, Odatsu T, Shinohara A, Baba K, Shibata Y, Sawase T. Effects of cleaning methods for custom abutment surfaces on gene expression of human gingival fibroblasts. *J Oral Sci*. 2017;59(4):533-539.
<https://doi.org/10.2334/josnusd.16-0681>
- Huang J-J, Jia L, Zhang Q-J, Li H-H, Zheng D-L, Zheng M. Anti-Microbial Effect of AgBr-NP@CTMAB on Streptococcus Mutans and Assessment of Surface Roughness Hardness and Flexural Strength of PMMA. *Int J Nanomedicine*. 2024;Volume 19:1273-1285.
<https://doi.org/10.2147/IJN.S436613>
- Masters EA, Trombetta RP, de Mesy Bentley KL, et al. Evolving concepts in bone infection: redefining “biofilm”, “acute vs. chronic osteomyelitis”, “the immune proteome” and “local antibiotic therapy.” *Bone Res*. 2019;7(1):20.
<https://doi.org/10.1038/s41413-019-0061-z>
- Krenn V, Thomas P, Thomsen M, et al. Histopathological particle algorithm: Particle identification in the synovia and the SLIM. *Z Rheumatol*. 2014;73(7):639-649
<https://doi.org/10.1007/s00393-013-1315-6>
- Labis V, Bazikyan E, Zhigalina O, et al. Assessment of dental implant surface stability at the nanoscale level. *Dent Mater*. 2022;38(6):924-934.
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.03.003>
- Labis V, Bazikyan E, Sizova S, et al. Immunopathological Inflammation in the Evolution of Mucositis and Peri-Implantitis. *Int J Mol Sci*. 2022;23(24):15797.
<https://doi.org/10.3390/ijms232415797>
- Бузмаков АВ, Асадчиков ВЕ, Золотов ДА, Рошин БС, Дымшиц ЮМ, Шишков АВ, и др. Лабораторные микротомографы: конструкция и алгоритмы обработки данных. *Кристаллография*. 2018;63(6):1007-1011
<https://doi.org/10.1134/S0023476118060073>
Buzmakov A.V., Asadchikov V.E., Zolotov D.A., Roshchin B.S., Dymshits Y.M., Shishkov V.A., et al. Laboratory Microtomographs: Design and Data Processing Algorithms. *Crystallography Reports*. 2018;63(6):1057-1061. (In Russ.)
<https://doi.org/10.1134/S106377451806007X>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Автор, ответственный за связь с редакцией

Дьячкова Ирина Геннадьевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский Институт», Москва, Российская Федерация

Для переписки: sig74@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7615-6878>

Лабис Варвара Владимировна, доктор медицинских наук, профессор кафедры хирургической стоматологии и имплантологии научно-образовательного института непрерывного медицинского образования имени Н. Д. Юшука, заведующая отделением отделением хирургической стоматологии №1 Клинического центра стоматологии научно-образовательного института стоматологии имени А. И. Евдокимова Российского университета медицины, Москва, Российская Федерация

Для переписки: Varvara2001@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7632-3234>

Таболин Игорь Вячеславович, ординатор кафедры стоматологии Национального научно-исследовательского института общественного здоровья имени Н. А. Семашко, Москва, Российская Федерация

Для переписки: tabolinigor37@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9654-4683>

Базикян Эрнест Арамович, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой хирургической стоматологии и имплантологии научно-образовательного института непрерывного медицинского образования имени Н. Д. Юшука Российского университета медицины, Москва, Российская Федерация

Для переписки: prof.bazikian@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9184-3737>

Золотов Денис Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский Институт», Москва, Российская Федерация

Для переписки: zolotovden@crys.ras.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3701-9517>

Асадчиков Виктор Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией рефлектометрии и малоуглового рассеяния Национального исследовательского центра «Курчатовский Институт», Москва, Российская Федерация

Для переписки: asad@crys.ras.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3602-7582>

Жигалина Ольга Михайловна, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии

Национального исследовательского центра «Курчатовский Институт», Москва, Российская Федерация

Для переписки: zhigal@crys.ras.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4721-4105>

Хмеленин Дмитрий Николаевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский Институт», Москва, Российская Федерация

Для переписки: dirq@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0894-5087>

Бейшер Елизавета Алексеевна, студент Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, инженер лаборатории электронной микроскопии Национального исследовательского центра «Курчатовский Институт», Москва, Российская Федерация

Для переписки: elizaveta.beisher@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3621-6639>

Сизова Светлана Викторовна, кандидат химических наук, научный сотрудник Института биоорганической химии имени академиков М. М. Шемакина и Ю. А. Овчинникова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Для переписки: sv.sizova@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0846-4670>

Олейников Владимир Александрович, доктор физико-математических наук, профессор заведующий лабораторией молекулярной биофизики Института биоорганической химии имени академиков М. М. Шемакина и Ю. А. Овчинникова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Для переписки: voleinik@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4623-4913>

Путь Владимир Анатольевич, доктор медицинских наук, профессор кафедры онкологии, радиотерапии и реконструктивной хирургии Института клинической медицины имени Н. В. Склифосовского Первого московского государственного медицинского университета имени И. М. Сеченова (Сеченовский Университет), Москва, Российская Федерация

Для переписки: pout-prof@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4150-9885>

Козлов Иван Генрихович, доктор медицинских наук, профессор кафедры организации и управления в сфере обращения лекарственных средств Первого московского государственного медицинского университета имени И. М. Сеченова (Сеченовский Университет), Москва, Российская Федерация

Для переписки: immunopharmacology@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/000-002-9694-5687>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Corresponding author:

Irina G. Dyachkova, PhD, Senior Researcher, National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation

For correspondence: sig74@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7615-6878>

Varvara V. Labis, DDS, PhD, DSc, Professor, Department of the Oral surgery and Implantology, N.D. Yushchuk Institute of Continuing Medical Education, Head of the Department of Oral Surgery No. 1, Clinical Center of Dentistry, A.I. Evdokimov Institute of Dentistry, Russian University of Medicine, Moscow, Russian Federation

For correspondence: Varvara2001@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7632-3234>

Igor V. Tabolin, DMD, Resident, Department of the Dentistry, N.A. Semashko National Research Institute of Public Health, Moscow, Russian Federation

For correspondence: tabolinigor37@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9654-4683>

Ernest A. Bazikyan, DDS, PhD, DSc, Professor, Head of the Department of Oral Surgery and Implantology, N.D. Yushchuk Institute of Continuing Medical Education, Russian University of Medicine, Moscow, Russian Federation

For correspondence: prof.bazikyan@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9184-3737>

Denis A. Zolotov, PhD, Senior Researcher, National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation

For correspondence: zolotovden@crys.ras.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3701-9517>

Victor E. Asadchikov, PhD, DSc, Professor, Chief Researcher, Head of the Laboratory of Reflectometry and Small-angle Scatterin, National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation

For correspondence: asad@crys.ras.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3602-7582>

Olga M. Zhigalina, PhD, DSc, Professor, PhD, Leading Researcher, Laboratory of Electron Microscopy, National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation

For correspondence: zhigal@crys.ras.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4721-4105>

Dmitriy N. Khmelenin, PhD, Leading Researcher, National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation

For correspondence: dirq@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0894-5087>

Elizaveta A. Beisher, Student, Bauman Moscow State Technical University, Engineer, National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation

For correspondence: elizaveta.beisher@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3621-6639>

Svetlana V. Sizova, PhD, Researcher, Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

For correspondence: sv.sizova@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0846-4670>

Vladimir A. Oleinikov, PhD, DSc, Professor, Head of the Laboratory Molecular Biophysics, Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

For correspondence: voleinik@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4623-4913>

Vladimir A. Put, PhD, DSc, Professor, Department of the Oncology, Radiotherapy and Reconstructive Surgery N.V. Sklifosovsky Institute of Clinical Medicine, First Moscow State Medical University named after I.M. Sechenov, (Sechenov University), Moscow, Russian Federation

For correspondence: pout-prof@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4150-9885>

Вклад авторов в работу. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE, а также согласны принять на себя ответственность за все аспекты работы: Лабис В. В. – разработка концепции, получение финансирования, проведение исследования, разработка методологии, административное руководство исследовательским проектом, предоставление ресурсов, валидация результатов, написание рукописи – рецензирование и редактирование; Таболин И. В. – проведение исследования, предоставление ресурсов; Базикян Э. А. – получение финансирования, предоставление ресурсов, научное руководство, написание рукописи – рецензирование и редактирование; Дьячкова И. Г. – формальный анализ, проведение исследования, разработка методологии, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи, написание рукописи – рецензирование и редактирование; Золотов Д. А. – формальный анализ, проведение исследования, разработка программного обеспечения, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи; Асадчиков В. Е. – получение финансирования, административное руководство исследовательским проектом, предоставление ресурсов, научное руководство; Жигалина О. М. – формальный анализ, проведение исследования, написание черновика рукописи; Хмеленин Д. Н. – проведение исследования, разработка программного обеспечения, валидация результатов, визуализация; Бейшер Е. А. – формальный анализ, проведение исследования, визуализация; Сизова С. В. – формальный анализ, проведение исследования, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи; Олейников В. А. – административное руководство исследовательским проектом, предоставление ресурсов, научное руководство; Путь В. А. – получение финансирования, научное руководство, написание рукописи – рецензирование и редактирование; Козлов И. Г. – разработка концепции, разработка методологии, административное руководство исследовательским проектом, предоставление ресурсов, научное руководство, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

Ivan G. Kozlov, MD, PhD, DSc, Professor, Department of the Organization and Management in the Field of Drug Circulation, First Moscow State Medical University named after I.M. Sechenov (Sechenov University), Moscow, Russian Federation

For correspondence: immunopharmacology@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-002-9694-5687>

Поступила / Article received 24.12.2025

Поступила после рецензирования / Revised 22.02.2026

Принята к публикации / Accepted 25.02.2026

Authors' contribution. All authors confirm that their contributions comply with the international ICMJE criteria and agree to take responsibility for all aspects of the work: V.V. Labis – conceptualization, funding acquisition, investigation, methodology, project administration, resources, validation, writing – original draft preparation; I.V. Tabolin – investigation, resources; E.A. Bazikyan – funding acquisition, resources, writing – review & editing; I.G. Dyachkova – formal analysis, investigation, methodology, validation, visualization, writing – review & editing; D.A. Zolotov – formal analysis, investigation, software, validation, visualization, writing – original draft preparation; V.E. Asadchikov – funding acquisition, project administration, resources, supervision; O.M. Zhigalina – formal analysis, investigation, writing – original draft preparation; D.N. Khmelenin – investigation, software, validation, visualization; E.A. Beisher – formal analysis, investigation, visualization; S.V. Sizova – formal analysis, investigation, validation, visualization, writing – original draft preparation; V.A. Oleinikov – project administration, resources, supervision; V.A. Put – funding acquisition, supervision, writing – review & editing; I.G. Kozlov – conceptualization, methodology, project administration, resources, supervision, writing – review & editing.