doi.org/10.17116/rosstomat20251803126

Оценка влияния различных методов обработки трех типов поверхности дентальных имплантатов на их морфологию и элементный состав при лечении периимплантита

© М.В. СОКОЛОВ[1, 2], Т.В. ФУРЦЕВ[1, 2], А.В. ШАБАНОВ[3]

[1]ФГБОУ ВО «Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого» Минздрава России, Красноярск, Россия;
[2]ООО «ЛНУПЦ «Мединдент», Красноярск, Россия;
[3]Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения РАН — обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения РАН», Красноярск, Россия

РЕЗЮМЕ

Цель исследования. Изучить изменения морфологической структуры и элементного состава дентальных имплантатов с тремя типами поверхности (TiO_2, SLA, RBM) после обработки различными методами — лазером Er, Cr:YSGG с длиной волны 2780 нм, Air Flow с эритритолом и ультразвуковым аппаратом Vector Paro.

Материал и методы. В исследование включено 36 дентальных имплантатов: 9 новых (по 3 каждого типа поверхности) использованы как контрольная группа, 27 имплантатов, извлеченных у пациентов с периимплантитом, были равномерно распределены в три подгруппы в зависимости от метода обработки. Морфология поверхности изучалась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), элементный состав поверхности — методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС).

Результаты. Лазерная обработка продемонстрировала универсальность и эффективность очистки без повреждения микрорельефа для всех типов поверхностей. Воздушно-абразивный метод Air Flow оказался наиболее результативным в отношении поверхности RBM, но показал остаточные загрязнения поверхности при обработке TiO_2 и SLA. Ультразвуковой метод с использованием аппарата Vector Paro оказался особенно эффективным для TiO_2-поверхности, вероятно, за счет ее гидрофильных свойств.

Заключение. Выбор метода очистки при лечении периимплантита должен учитывать тип и особенности поверхности дентального имплантата. Лазер Er, Cr:YSGG показал универсальность, в то время как Air Flow и Vector Paro более эффективны при использовании для определенных типов поверхностей.

Ключевые слова: *дентальная имплантация, периимплантит, поверхность имплантата, эрбиевый лазер.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Соколов М.В. — https://orcid.org/0009-0006-1457-105X
Фурцев Т.В. — https://orcid.org/0000-0002-5300-9274
Шабанов А.В. — https://orcid.org/0000-0002-2389-4698
Автор, ответственный за переписку: Соколов М.В. — e-mail: maks_sokoloff@mail.ru

КАК ЦИТИРОВАТЬ:
Соколов М.В., Фурцев Т.В., Шабанов А.В. Оценка влияния различных методов обработки трех типов поверхности дентальных имплантатов на их морфологию и элементный состав при лечении периимплантита. *Российская стоматология*. 2025;18(3):26–33. https://doi.org/10.17116/rosstomat20251803126

Evaluation of the influence of different methods of processing three types of dental implant surfaces on their morphology and elemental composition in the treatment of peri-implantitis

© M.V. SOKOLOV[1, 2], T.V. FURTSEV[1, 2], A.V. SHABANOV[3]

[1]Voino-Yasenetsky Krasnoyarsk State Medical University, Krasnoyarsk, Russia;
[2]Medident LLC, Krasnoyarsk, Russia;
[3]Kirensky Institute of Physics, Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

ABSTRACT

Objective. To investigate changes in the morphological structure and elemental composition of dental implants with three types of surface (TiO_2, SLA, RBM) after treatment with various methods — Er, Cr: YSGG laser with a wavelength of 2780 nm, Air Flow with erythritol and Vector Paro ultrasound device.

Material and methods. A total of 36 dental implants were included: 9 new implants (3 of each surface type) were used as the control group, and 27 implants, explanted from patients with peri-implantitis, were evenly divided into three subgroups according to the cleaning method used. Surface morphology was evaluated using scanning electron microscopy (SEM), and elemental composition was analyzed using energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS).

Results. Laser treatment demonstrated versatility and cleaning efficiency without damaging the microrelief for all types of surfaces. The Air Flow air-abrasive method was most effective for the RBM surface, but showed residual surface contamination when treated with TiO_2 and SLA. The ultrasonic method using the Vector Paro device was especially effective for the TiO_2 surface, probably due to its hydrophilic properties.
Conclusion. The choice of decontamination method for the treatment of peri-implantitis should take into account the surface type and characteristics of the dental implant. The Er, Cr:YSGG laser proved to be a universal and effective method, while Air Flow and Vector Paro were more efficient when used for specific surface types.

Keywords: *dental implantation, periimplantitis, implant surface, erbium laser.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Sokolov M.V. — https://orcid.org/0009-0006-1457-105X
Furtsev T.V. — https://orcid.org/0000-0002-5300-9274
Shabanov A.V. — https://orcid.org/0000-0002-2389-4698
Corresponding author: Sokolov M.V. — e-mail: maks_sokoloff@mail.ru

TO CITE THIS ARTICLE:
Sokolov MV, Furtsev TV, Shabanov AV. Evaluation of the influence of different methods of processing three types of dental implant surfaces on their morphology and elemental composition in the treatment of peri-implantitis. *Russian Journal of Stomatology.* 2025;18(3):26–33. (In Russ.). https://doi.org/10.17116/rosstomat20251803126

Актуальность

Характеристики поверхности дентального имплантата являются одним из ключевых факторов, влияющих на успешность остеоинтеграции [1—3]. Морфология и элементный состав поверхности оказывают прямое влияние на клеточную адгезию, пролиферацию, дифференцировку остеогенных клеток, а также на устойчивость к микробной колонизации [4—6]. В современной стоматологической практике применяются различные типы поверхностей имплантатов, среди наиболее распространенных — TiO_2 (анодированный диоксид титана), SLA (пескоструйная обработка поверхности оксидом алюминия с травлением неорганической кислотой) и RBM (обработка поверхности β-трикальцийфосфатом с травлением органической кислотой), каждый из которых обладает уникальными структурно-химическими характеристиками.

При развитии периимплантита возникает необходимость в удалении микробной биопленки и патологических тканей с поверхности имплантата [7—9]. Однако методы обработки, используемые в этих целях, могут оказывать выраженное воздействие на микрорельеф и химическую структуру поверхности [10—12]. Повреждение или изменение поверхностного слоя может повлиять на химико-биологические свойства имплантата и затруднить его повторную остеоинтеграцию [13].

Широко применяемые методы обработки поверхности имплантатов, такие как лазерная обработка, воздушно-абразивная очистка (Air Flow) и использование ультразвуковых систем (Vector Paro), различаются по типу и интенсивности воздействия на поверхность имплантата [14—16]. Это обусловливает необходимость дифференцированного подхода к выбору метода обработки в зависимости от типа поверхности имплантата. Оценка степени влияния различных методов на морфологию и элементный состав поверхности имплантатов разных типов остается актуальной задачей современной стоматологии.

Цель исследования — изучить изменения морфологической структуры и элементного состава дентальных имплантатов с тремя типами поверхности (TiO_2, SLA, RBM) после обработки различными методами — лазером Er, Cr:YSGG с длиной волны 2780 нм, воздушно-абразивной системой Air Flow с эритритолом и ультразвуковым аппаратом Vector Paro.

Материал и методы

Подготовка имплантатов к эксперименту

В исследование было включено 36 дентальных имплантатов трех производителей, различающихся по типу поверхности:

- — имплантаты с анодированной поверхностью из диоксида титана (TiO_2) от компании Nobel Biocare (Швеция);
- — имплантаты с поверхностью, полученной методом пескоструйной обработки оксидом алюминия с последующим травлением неорганической кислотой (SLA), от компании XIVE Dentsply Sirona (Германия);
- — имплантаты с поверхностью, обработанной β-трикальцийфосфатом и травленой органической кислотой (RBM), от компании BioHorizons (США).

Контрольная группа включала 9 новых имплантатов (по 3 каждого типа поверхности: TiO_2, SLA и RBM), извлеченных непосредственно из заводской упаковки и ранее не использовавшихся в клинической практике.

Остальные 27 имплантатов были извлечены у пациентов с клинически подтвержденным диагнозом периимплантита и распределены в три подгруппы в зависимости от метода последующей обработки. Каждая подгруппа включала 9 имплантатов — по 3 с каждым типом поверхности.

В первой группе проводилась лазерная обработка с использованием Er, Cr:YSGG-лазера (Biolase, США). Режим работы: длина волны 2780 нм, мощность 1,5 Вт, частота 20 Гц, соотношение вода/воздух 50/50, наконечник SFT8-18 мм, продолжительность обработки 60 с.

Во второй группе применялась воздушно-абразивная очистка аппаратом Air Flow Handy 3.0 perio с наполнителем AIR FLOW PLUS с эритритолом (гранулы 14 мкм) (EMS, Швейцария). Режим работы: давление 2,2 бар, расход воды 41,5 мл/мин, продолжительность обработки 30 с.

Третья группа подвергалась ультразвуковой обработке с использованием аппарата Vector Paro (Dürr Dental, Германия) с пародонтологической насадкой Supra. Режим работы: частота 25 кГц, расход воды 30 мл/мин, суспензия Vector Fluid polish (размер частиц <10 мкм), продолжительность обработки 60 с.

Оценка изменений морфологии поверхности имплантатов

Изучение морфологических изменений поверхности имплантатов проводилось методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микроскопа SU3500 SEM (Hitachi, Япония) **(рис. 1—3)**. Образцы закреплялись на алюминиевых держателях и исследовались в режиме регистрации вторичных электронов (SE, Secondary Electrons), который обладает высокой чувствительностью к микрорельефу поверхности. В данном режиме электронный пучок сканирует поверхность образца, вызывая эмиссию низкоэнергетических электронов с поверхности материала (обычно с глубины 1—10 нм). Далее вторичные электроны регистрируются детектором, формируя изображение с высокой контрастностью, отражающее мельчайшие особенности топографии поверхности имплантата, такие как шероховатость, пористость, наличие царапин и глубоких повреждений.

Съемка проводилась при увеличении ×1,50k, поле зрения 30,0 μm. Исследование выполнялось при ускоряющем напряжении 15,0 кВ, что обеспечивало достаточную энергию для возбуждения электронных процессов в верхних слоях исследуемого материала. Ускоряющее напряжение определяет кинетическую энергию электронов пучка: чем выше напряжение, тем глубже проникновение электронов и тем выше разрешение и четкость изображения поверхности имплантата.

Для каждой группы имплантатов фиксировали изображения характерных участков поверхности, позволяющие провести качественную оценку микрорельефа и выявить изменения, вызванные применением различных методов обработки. Для сопоставления и контроля результатов аналогичное исследование проводилось на новых имплантатах.

Оценка изменения элементного состава поверхности имплантатов

Для анализа элементного состава исследуемых имплантатов использовался рентгеноспектральный энергодисперсионный анализатор XFlash 6160 (Bruker, Германия), интегрированный в сканирующий электронный микроскоп SU3500 SEM **(табл. 1—3)**. Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭДС) позволяет идентифицировать химические элемен-

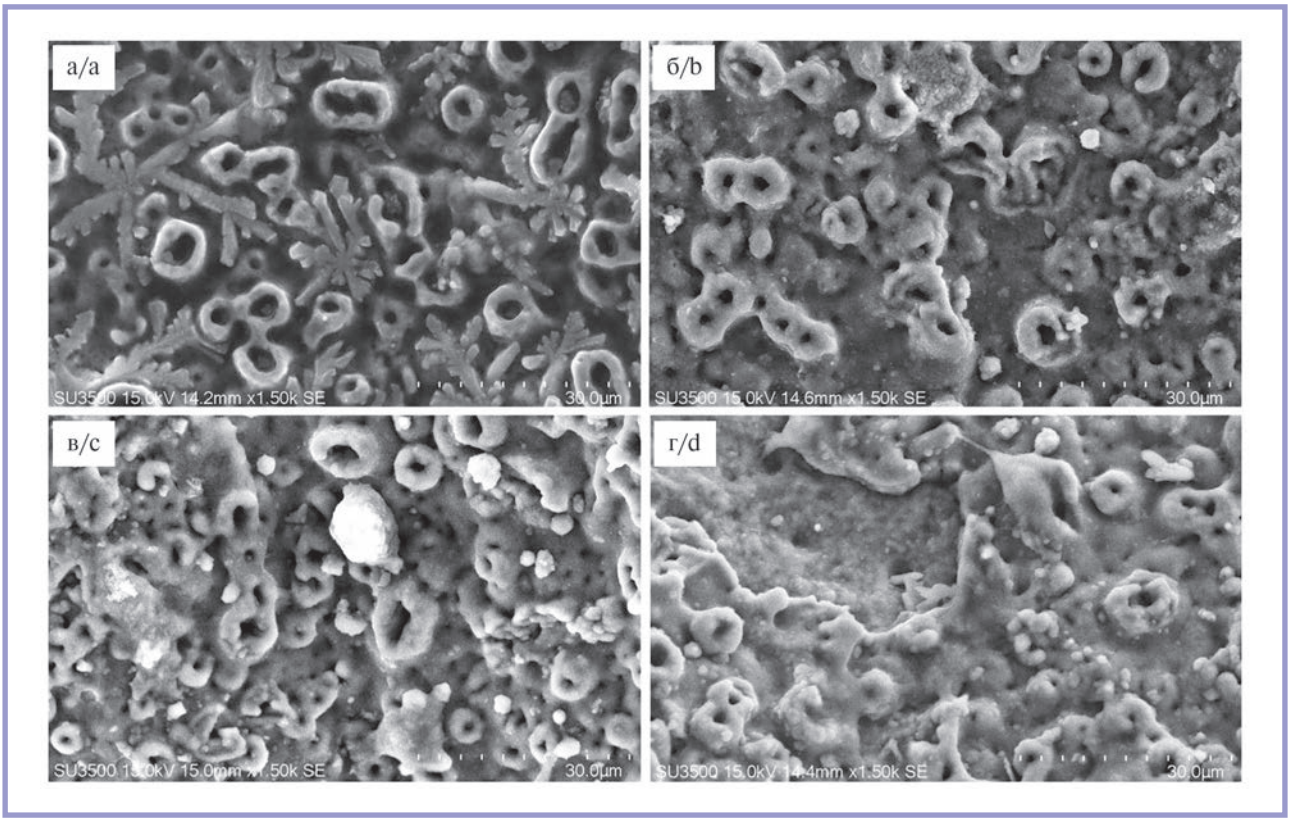


Рис. 1. **Микроструктура дентального имплантата с поверхностью типа TiO_2 (увеличение ×1500).**
а — новый имплантат; б — имплантат после обработки лазером Er, Cr:YSGG; в — имплантат после обработки системой Air Flow; г — имплантат после обработки аппаратом Vector Paro.

Fig. 1. **Microstructure of a dental implant with a TiO_2 surface (×1500 magnification).**
a — new implant; b — implant after treatment with an Er, Cr:YSGG laser; c — implant after treatment with the Air Flow system; d — implant after treatment with the Vector Paro device.

ты на поверхности образца за счет регистрации характеристического рентгеновского излучения, возникающего в ответ на облучение электронами. При взаимодействии первичного электронного пучка с атомами материала происходят ионизационные процессы, в результате которых испускаются рентгеновские фотоны с энергией, характерной для конкретного элемента. Детектор ЭДС регистрирует данные фотоны, формируя спектр, по которому можно определить качественный и количественный состав исследуемой поверхности. Обработка и интерпретация полученных спектров проводились с использованием специализированного программного обеспечения Quantax 70 (Bruker, Германия) для полуколичественного анализа и автоматической идентификации элементов по характеристическим пикам.

Перед началом спектрального анализа была выполнена калибровка энергодисперсионного спектрометра с использованием эталона меди (Cu) при ускоряющем напряжении 15,0 кВ. Калибровка проводилась с целью проверки точности регистрации рентгеновских пиков и настройки атомной шкалы прибора.

Для каждого имплантата проводился локальный точечный анализ на двух различных участках (спектрах) поверхности. Области съемки выбирались в соответствии с зонами, исследованными при СЭМ, что обеспечивало сопоставимость морфологических и элементных данных. В качестве контрольных образцов также были исследованы новые, не использовавшиеся в клинической практике имплантаты.

Дополнительно, для оценки исходного состояния инфицированной поверхности, проводился элементный анализ необработанных участков, находившихся в непосредственном контакте с грануляционной тканью. Полученные данные позволили зафиксировать начальный уровень загрязненности поверхности до применения методов обработки и провести сравнительную оценку их эффективности.

Статистическая обработка проводилась с использованием программ Microsoft Excel 2016 и Statistica 12.0 (StatSoft Inc., США). Показатели элементного состава представлены в виде диапазонов значений (at %). Учитывая ограниченный объем выборки, для сравнения использовались методы описательной статистики и непараметрический анализ с применением критерия Уилкоксона. Статистически значимыми различия считались при $p<0,05$.

Результаты и обсуждение

Обработка имплантатов лазером Er, Cr:YSGG с длиной волны 2780 нм показала наилучшие результаты для всех типов поверхности — как по сохранности морфологии поверхности, так и по данным элементного анализа. СЭМ выявила отсутствие следов оплавления и глубоких струк-

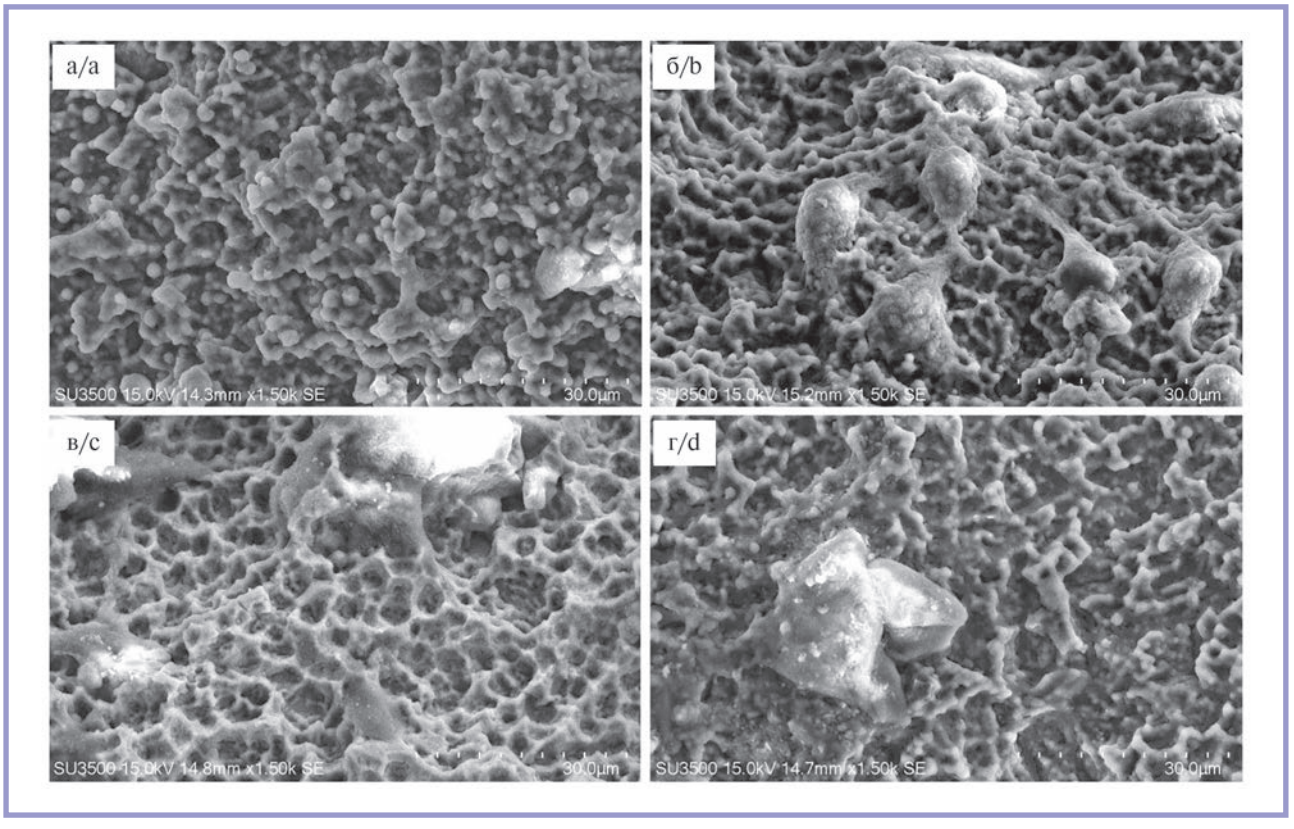


Рис. 2. **Микроструктура дентального имплантата с поверхностью типа SLA (увеличение ×1500).**
а — новый имплантат; б — имплантат после обработки лазером Er, Cr:YSGG; в — имплантат после обработки системой Air Flow; г — имплантат после обработки аппаратом Vector Paro.

Fig. 2. **Microstructure of a dental implant with an SLA surface (×1500 magnification).**
a — new implant; b — implant after treatment with an Er, Cr:YSGG laser; c — implant after treatment with the Air Flow system; d — implant after treatment with the Vector Paro device.

турных повреждений **(см. рис. 1б, 2б, 3б)**. Это обусловлено бесконтактным механизмом воздействия лазера, основанным на фотоакустическом и гидрокинетическом эффектах, обеспечивающих деликатную и в то же время эффективную очистку. Рабочий режим лазера исключает термическое повреждение поверхности имплантата, так как диапазон температур при его воздействии с водяным охлаждением составляет 80—300°C, что существенно ниже температуры плавления титана (1668°C) [17].

Результаты энергодисперсионного анализа подтвердили эффективность очистки эрбиевым лазером: на всех поверхностях после обработки наблюдалось значительное снижение уровня загрязнения органическим углеродом (C) — 0,35—0,71 at % для TiO_2 **(см. табл. 1)**; 0,32—0,55 at % для SLA **(см. табл. 2)**; 0,41—0,57 at % для RBM **(см. табл. 3)**, а также полное отсутствие неорганических примесей (Na, Si, S, Cl, Ca), обнаруженных на имплантатах, извлеченных вследствие периимплантита и не подвергавшихся обработке, за исключением алюминия (Al) и фосфора (P), которые являются остаточными компонентами, характерными для заводской обработки поверхности имплантатов. Также увеличилось процентное содержание титана (Ti) за счет удаления большей части органических и минеральных отложений. Результаты элементного анализа максимально приблизились к результатам новых (контрольных) образцов. Это делает эрбиевый лазер наиболее эффективным и универсальным средством очистки поверхности имплантата.

Применение воздушно-абразивной обработки аппаратом Air Flow Handy 3.0 perio с наполнителем AIR FLOW PLUS с эритритолом не вызвало значительных повреждений ни у одного из типов поверхностей имплантатов. Согласно данным СЭМ, микрорельеф оставался неизменным, сохранялись исходные характеристики пористости и структуры **(см. рис. 1в, 2в, 3в).**

Однако данные энергодисперсионного анализа выявили различия в эффективности очистки в зависимости от типа поверхности имплантата. Наименьшее количество остаточных загрязнений зафиксировано на поверхности типа RBM: содержание углерода (C) составило 9,10–9,23 at %, а титана (Ti) — 27,94–28,90 at %, что близко к значениям новых имплантатов **(см. табл. 3)**. У поверхностей TiO_2 и SLA уровень углерода также значительно снизился по сравнению с имплантатами, извлеченными вследствие периимплантита и не подвергавшимися обработке, но остался несколько выше, чем в контрольной группе: 9,39–10,96 at % для TiO_2 **(см. табл. 1)** и 9,53–10,20 at % для SLA **(см. табл. 2)**.

Повышенное содержание углерода (C) и кремния (Si) при обработке данным методом связано с химическим составом компонентов используемого наполнителя: эритритола ($C_4H_{10}O_4$) и аморфного диоксида кремния (SiO_2). Более шероховатая микроструктура поверхностей типа TiO_2 и SLA

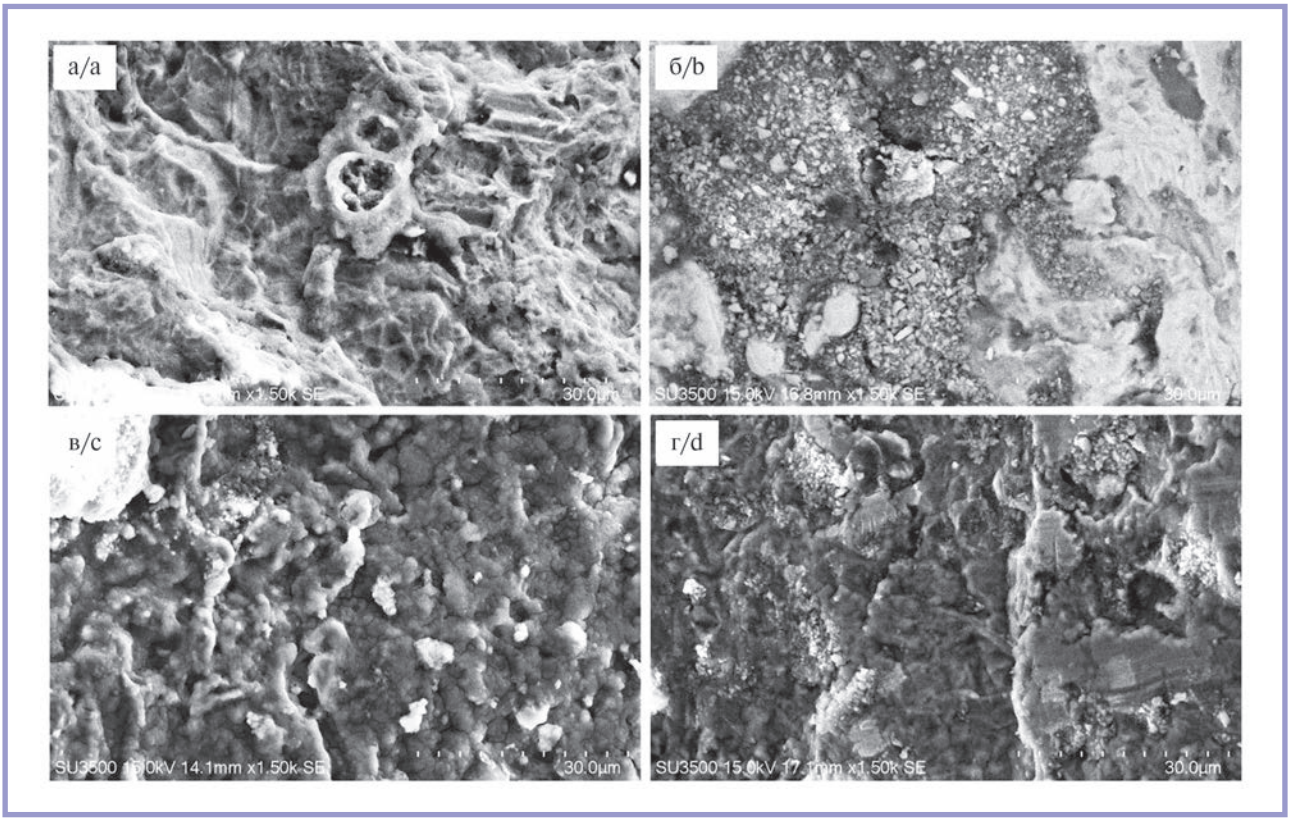


Рис. 3. **Микроструктура дентального имплантата с поверхностью типа RBM (увеличение ×1500).**
а — новый имплантат; б — имплантат после обработки лазером Er, Cr:YSGG; в — имплантат после обработки системой Air Flow; г — имплантат после обработки аппаратом Vector Paro.

Fig. 3. **Microstructure of a dental implant with an RBM surface (×1500 magnification).**
a — new implant; b — implant after treatment with an Er, Cr:YSGG laser; c — implant after treatment with the Air Flow system; d — implant after treatment with the Vector Paro device.

Таблица 1. **Элементный состав поверхности типа TiO_2**

Table 1. **Elemental composition of TiO_2 type surface**

ПОВЕРХНОСТЬ TiO_2										
Спектр (область)	Химические элементы, at %									
	C	O	Na	Al	Si	P	S	Cl	Ca	Ti
Новый имплантат (контрольный образец)										
1	7,56	57,46	—	—	—	6,14	—	—	—	28,83
2	6,58	59,66	—	—	—	5,30	—	—	—	28,45
Периимплантит без обработки поверхности										
1	20,23	30,94	0,29	0,16	0,21	11,32	0,22	—	14,35	22,27
2	18,25	29,84	0,41	—	0,29	9,26	0,38	0,21	15,73	25,62
Периимплантит + обработка поверхности лазером Er,Cr:YSGG										
1	0,35	70,39	—	—	—	1,86	—	—	—	27,39
2	0,71	65,69	—	—	—	2,56	—	—	—	31,03
Периимплантит + обработка поверхности методом Air Flow с эритритолом										
1	10,96	49,92	—	—	4,80	0,36	-	0,45	7,60	25,90
2	9,39	45,59	—	—	5,63	0,64	0,69	0,81	9,57	27,67
Периимплантит + обработка поверхности аппаратом Vector Paro										
1	6,49	56,75	0,84	—	—	5,78	—	—	8,61	21,52
2	5,97	52,87	0,33	—	—	4,60	—	—	10,39	25,83

Таблица 2. **Элементный состав поверхности типа SLA**

Table 2. **Elemental composition of the SLA type surface**

ПОВЕРХНОСТЬ SLA										
Спектр (область)	Химические элементы, at %									
	C	O	Na	Al	Si	P	S	Cl	Ca	Ti
Новый имплантат (контрольный образец)										
1	8,91	58,71	—	0,97	0,23	—	0,32	—	—	30,85
2	6,34	61,84	—	0,74	0,14	—	0,51	—	—	30,42
Периимплантит без обработки поверхности										
1	21,20	36,28	0,69	0,36	0,13	9,51	0,29	0,17	10,87	20,49
2	19,68	38,36	0,78	0,59	0,18	10,70	0,49	0,28	7,26	21,67
Периимплантит + обработка поверхности лазером Er,Cr:YSGG										
1	0,55	69,37	—	0,11	—	—	—	—	—	29,96
2	0,32	65,93	—	0,14	—	—	—	—	—	33,60
Периимплантит + обработка поверхности методом Air Flow с эритритолом										
1	9,53	47,17	—	0,63	6,88	—	—	0,31	9,52	25,95
2	10,20	52,47	0,44	0,51	7,93	—	—	0,16	6,40	21,88
Периимплантит + обработка поверхности аппаратом Vector Paro										
1	3,47	62,86	—	0,34	—	6,30	—	—	8,55	18,47
2	2,78	57,81	—	0,15	—	5,26	—	—	11,86	22,13

способствует частичному удержанию этих компонентов в отличие от более сглаженной поверхности типа RBM, где данный эффект выражен в меньшей степени. Следует также отметить, что такой метод обработки не обеспечил полной очистки от химических загрязнений: на поверхности TiO_2 выявлены остаточные следы серы (S) и хлора (Cl) **(см. табл. 1)**, на SLA — натрия (Na), алюминия (Al) и хлора (Cl) **(см. табл. 2)**.

Несмотря на отсутствие выраженных морфологических изменений, применение метода Air Flow для поверхностей типа TiO_2 и SLA сопровождается повышенным риском остаточного химического загрязнения, обусловленным их большей шероховатостью. В то же время для имплантатов с поверхностью типа RBM этот метод продемонстрировал более высокую эффективность и может рассматриваться как до-

Таблица 3. **Элементный состав поверхности типа RBM**

Table 3. **Elemental composition of the RBM type surface**

ПОВЕРХНОСТЬ RBM										
Спектр (область)	Химические элементы, at %									
	C	O	Na	Al	Si	P	S	Cl	Ca	Ti
Новый имплантат (контрольный образец)										
1	8,70	53,32	—	—	—	8,56	—	—	4,89	24,52
2	8,63	56,90	—	—	—	9,20	—	—	3,58	21,68
Периимплантит без обработки поверхности										
1	20,58	33,40	0,72	—	0,51	11,80	0,30	0,12	11,32	21,24
2	19,72	34,21	0,68	0,32	0,27	9,82	0,28	—	12,50	22,19
Периимплантит + обработка поверхности лазером Er,Cr:YSGG										
1	0,41	69,43	—	—	—	0,22	—	—	—	29,93
2	0,57	67,56	—	—	—	0,17	—	—	—	31,69
Периимплантит + обработка поверхности методом Air Flow с эритритолом										
1	9,10	54,36	—	—	0,12	2,57	—	—	5,90	27,94
2	9,23	52,14	—	—	0,16	4,89	—	—	4,67	28,90
Периимплантит + обработка поверхности аппаратом Vector Paro										
1	4,64	53,34	0,23	—	0,11	7,60	0,29	—	9,65	24,13
2	5,43	51,20	0,15	0,21	—	8,91	—	—	8,24	25,85

полнительный способ очистки поверхности данного типа при невозможности использования лазерной обработки.

Применение метода ультразвуковой обработки аппаратом Vector Paro с суспензией Vector Fluid polish, содержащей частицы гидроксиапатита ($Ca_5(PO_4)_3OH$), согласно данным СЭМ, не вызвало значительных изменений морфологии всех типов поверхности дентальных имплантатов **(см. рис. 1г, 2г, 3г)**.

Результаты энергодисперсионного анализа показали наилучшую эффективность метода для имплантатов с анодированной поверхностью TiO_2. Уровень остаточного углерода составил 5,97—6,49 at %, а содержание титана достигало 21,52—25,83 at %, что сопоставимо с контрольными образцами **(см. табл. 1)**. Предположительно, высокая эффективность очистки в данном случае связана с особенностями TiO_2-поверхности: наличие стабильного оксидного слоя и высокая гидрофильность способствуют лучшей ретенции суспензии и равномерному распределению ультразвуковых колебаний. Это обеспечивает более эффективную передачу энергии от ультразвуковой насадки к поверхности имплантата и, как следствие, более тщательную очистку.

На имплантатах с поверхностью типа RBM очистка оказалась менее эффективной. Процентное содержание титана составляло 24,13—25,85 at %, а углерода — 4,64—5,43 at %. В спектрах сохранялись остаточные загрязнения: натрий (Na), алюминий (Al), кремний (Si) и сера (S) **(см. табл. 3)**. На поверхности типа SLA после обработки выявлялись остатки алюминия (Al), оставшегося после заводской пескоструйной обработки оксидом алюминия (Al_2O_3), а также более низкое содержание титана (18,47—22,13 at %) и повышенное содержание фосфора (P) и кальция (Ca). Содержание углерода составляло 2,78—3,47 at % **(см. табл. 2)**.

Дополнительно стоит отметить, что за счет использования суспензии на основе гидроксиапатита на всех обработанных поверхностях наблюдалось увеличение содержания фосфора (P) и кальция (Ca). Эти элементы могут способствовать усилению процесса остеоинтеграции за счет биомиметической природы гидроксиапатита [18].

Таким образом, ультразвуковой метод обработки с использованием аппарата Vector Paro проявил наибольшую эффективность в отношении TiO_2-поверхностей и может использоваться как альтернатива лазерной очистке.

Заключение

Полученные результаты подтвердили, что эффективность удаления загрязнений с поверхности дентальных имплантатов при лечении периимплантита зависит как от применяемого метода обработки, так и от типа поверхности имплантата. Наиболее универсальным и эффективным методом для всех исследованных типов поверхностей оказалась обработка лазером Er, Cr:YSGG с длиной волны 2780 нм, обеспечившая качественную очистку без повреждения микрорельефа с минимальным уровнем остаточного загрязнения. Воздушно-абразивная обработка с использованием аппарата Air Flow с эритритолом показала наилучшие результаты для имплантатов с поверхностью RBM за счет ее меньшей шероховатости. Ультразвуковой метод с применением аппарата Vector Paro продемонстрировал высокую эффективность в отношении поверхности TiO_2, что, вероятно, связано с ее физико-химическими свойствами. Таким образом, выбор метода очистки поверхности имплантата при лечении периимплантита должен осуществляться с учетом его микроструктуры и типа поверхности — для достижения максимальной эффективности лечения.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interest.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовки публикации.

Благодарности. Исследование выполнено с использованием оборудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ «КНЦ СО РАН».

Funding source. The authors declare that no external funding was received for the conduct of this study or the preparation of this publication.

Acknowledgments. The study was conducted using equipment provided by Krasnoyarsk Regional Center of Research Equipment of Federal Research Center «Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS».

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Yu YM, Lu YP, Zhang T, et al. Biomaterials science and surface engineering strategies for dental peri-implantitis management. *Military Medical Research*. 2024;11(1):29. https://doi.org/10.1186/s40779-024-00532-9
2. Teulé-Trull M, Altuna P, Arregui M, et al. Antibacterial coatings for dental implants: A systematic review. *Dental Materials*. 2025;41(3):229-247. https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.12.001
3. Xu Z, Krajewski S, Weindl T, et al. Application of totarol as natural antibacterial coating on dental implants for prevention of peri-implantitis. *Materials Science and Engineering: C, Materials for Biological Applications*. 2020; 110:110701. https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110701
4. Сабирова А.И., Мамытова А.Б., Кыдыралиева Р.Б. и др. Роль микробиома полости рта в развитии заболеваний тканей пародонта и атеросклеротически ассоциированной кардиоваскулярной патологии. *Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета*. 2024;24(1):84-90. Sabirova AI, Mamytova AB, Kydyralieva RB, et al. The role of the oral microbiome in the development of periodontal tissue diseases and atherosclerotic-associated cardiovascular pathology. *Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University*. 2024;24(1):84-90. (In Russ.). https://doi.org/10.36979/1694-500X-2024-24-1-84-90
5. Садиков Р.А., Плоткина Ю.В., Черновол Е.М. и др. Комплексный анализ элементного состава и поверхностной морфологии титановых абатментов современных производителей. *Пародонтология*. 2024;29(1):58-66. Sadikov RA, Plotkina YuV, Chernovol EM, et al. Comprehensive analysis of the elemental composition and surface relief of titanium abutments from contemporary manufactures. *Parodontologiya*. 2024;29(1):58-66. (In Russ.). https://doi.org/10.33925/1683-3759-2024-865
6. Zhang Y, Fan Z, Xing Y, et al. Effect of microtopography on osseointegration of implantable biomaterials and its modification strategies. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2022;10:981062. https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.981062
7. Belibasakis GN, Manoil D. Microbial community-driven etiopathogenesis of peri-implantitis. *Journal of Dental Research*. 2021;100(1):21-28. https://doi.org/10.1177/0022034520949851
8. Săndulescu M. Peri-implantitis, biofilm contamination and peri-implant bone loss. *Germs*. 2022;12(4):432-433. https://doi.org/10.18683/germs.2022.1348
9. Бурлакова Л.А., Гизингер О.А., Мураев А.А. и др. Клинические и микробиологические результаты комплексного лечения дентального периимплантита. *Проблемы стоматологии*. 2024;20(3):91-97. Burlakova LA, Gizinger OA, Muraev AA, et al. Clinical and microbiological results of complex treatment of dental periimplantitis. *Problemy stomatologii*. 2024;20(3):91-97. (In Russ.). https://doi.org/10.18481/2077-7566-2024-20-3-91-97
10. Sanz-Martín I, Paeng K, Park H, et al. Significance of implant design on the efficacy of different peri-implantitis decontamination protocols. *Clinical Oral Investigations*. 2021;25(6):3589-3597. https://doi.org/10.1007/s00784-020-03681-y
11. Bayrak M, Kocak-Oztug NA, Gulati K, et al. Influence of clinical decontamination techniques on the surface characteristics of SLA titanium implant. *Nanomaterials (Basel)*. 2022;12(24):4481. https://doi.org/10.3390/nano12244481
12. Фурцев Т.В., Зеер Г.М. Сравнительное исследование поверхностей трех типов имплантатов (TiUnite, SLA, RBM) с контрольным образцом, периимплантитом, обработанных лазером Er;Cr;YSGG длиной волны 2780 нм. *Стоматология*. 2019;98(3):52-55. Furtsev TV, Zeer GM. Comparative research of implants with three types of surface processing (TiUnite, SLA, RBM), control, with periimplantitis and processed by 2780 nm Er;Cr;YSGG laser. *Stomatology*. 2019;98(3):52-55. (In Russ.). https://doi.org/10.17116/stomat20199803152
13. Tan NCP, Miller CM, Antunes E, Sharma D. Impact of physical decontamination methods on zirconia implant surface and subsequent bacterial adhesion: An in-vitro study. *Clinical and Experimental Dental Research*. 2022;8(1):313-321. https://doi.org/10.1002/cre2.486
14. Hentenaar DFM, De Waal YCM, Stewart RE, et al. Erythritol air polishing in the surgical treatment of peri-implantitis: A randomized controlled trial. *Clinical Oral Implants Research*. 2022;33(2):184-196. https://doi.org/10.1111/clr.13881
15. Wang CW, Ashnagar S, Gianfilippo DR, et al. Laser-assisted regenerative surgical therapy for peri-implantitis: A randomized controlled clinical trial. *Journal of Periodontology*. 2021;92(3):378-388. https://doi.org/10.1002/JPER.20-0040
16. Cosgarea R, Roccuzzo A, Jepsen K, et al. Efficacy of mechanical/physical approaches for implant surface decontamination in non-surgical submarginal instrumentation of peri-implantitis. A systematic review. *Journal of Clinical Periodontology*. 2023;50(Suppl 26):188-211. https://doi.org/10.1111/jcpe.13762
17. Hou C, Liu Y, Xu W, et al. Additive manufacturing of functionally graded porous titanium scaffolds for dental applications. *Biomaterials Advances*. 2022;139:213018. https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2022.213018
18. Butera A, Maiorani C, Gallo S, et al. Biomimetic action of zinc hydroxyapatite on remineralization of enamel and dentin: a review. *Biomimetics (Basel)*. 2023;8(1):71. https://doi.org/10.3390/biomimetics8010071

Поступила 04.07.2025
Received 04.07.2025
Принята к печати 15.07.2025
Accepted 15.07.2025