

Экспериментальное исследование структурированной импульсным волоконным иттербиевым лазером поверхности титановых имплантатов

А.И. Яременко¹, Е.А. Зерницкая¹, П.А. Зотов¹, Ю.Ю. Карлагина², Е.Е. Егорова², Г.В. Одинцова²

¹Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Резюме

Актуальность. В настоящее время существуют несколько основных методов структурирования поверхности дентальных имплантатов. Крайне перспективным способом структурирования поверхности является лазерная обработка. Благодаря данной технологии возможно создавать упорядоченный рельеф поверхности имплантатов без использования химических реагентов и всего за один технологический этап. Цель исследования – сравнить и оценить *in vivo* стабильность и остеоинтеграцию двух различных поверхностей дентальных имплантатов, структурированных с помощью иттербиевого волоконного импульсного лазера с длиной волны 1064 нм.

Материалы и методы. В исследовании было использовано 60 дентальных имплантатов. Иттербиевым лазером с длиной волны 1064 нм созданы два типа поверхности дентальных имплантатов: в виде лунок и с параллельными канавками. Для сравнения также в эксперимент был включен полированный дентальный имплантат (без лазерного структурирования поверхности). Исследование проводилось на 15 лабораторных животных (кролики массой 3,5-4,0 кг, самцы). Установка имплантатов производилась в большеберцовые кости. Каждому кролику установлено по четыре имплантата со всеми типами поверхности единого диаметра и длины.

Результаты. Лабораторные животные выводились из эксперимента на сроке 1,5 и 3 месяца после операции. Для оценки стабильности имплантатов был применен метод RFA (Resonance Frequency Analysis), основанный на регистрации резонансных электромагнитных колебаний имплантата и окружающей кости при воздействии на них электромагнитного поля (Osstell ISQ). Также было произведено гистологическое исследование недекальцинированных костных блоков на лазерном сканирующем конфокальном микроскопе (Carl Zeiss LSM 780) и проведена гистоморфометрия (BIC-индекс, Bone implant contact). Костные блоки подготавливались по специальной методике – пропитка и заливка исследуемого материала в пластмассы и синтетические смолы. Из полученных блоков изготавливали срезы толщиной 40-50 мкм и окрашивали красителем Ниссля (толуидиновый синий).

Заключение. Лазерное структурирование поверхности дентальных имплантатов является перспективным методом обработки. У 59 из 60 (98,3%) имплантатов произошла остеоинтеграция, при этом в костной ткани отсутствовали любые признаки воспаления. Данные результаты позволяют производить дальнейшие исследования дентальных имплантатов с различным дизайном поверхности, структурированной иттербиевым лазером.

Ключевые слова: дентальные имплантаты, иттербиевый волоконный импульсный лазер, лазерное структурирование поверхности, остеоинтеграция, лабораторные животные

Для цитирования: Яременко А.И., Зерницкая Е.А., Зотов П.А., Карлагина Ю.Ю., Егорова Е.Е., Одинцова Г.В. Экспериментальное исследование структурированной импульсным волоконным иттербиевым лазером поверхности титановых имплантатов. Пародонтология. 2021;26(2):88-95. <https://doi.org/10.33925/1683-3759-2021-26-2-88-95>.

Experimental study of the Ti-implant surfaces structured by the ytterbium-doped pulsed fiber laser

A.I. Yaremenko¹, E.A. Zernitskaya¹, P.A. Zotov¹, Yu.Yu. Karlagina², E.E. Egorova², G.V. Odintsova²

¹Pavlov First Saint-Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, Russian Federation

²ITMO University, Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract

Relevance. Currently, there are several basic techniques for the dental implant surface structuring. Laser treatment is an extremely promising technique for the surface structuring. This technology allows creating regular implant surface without using chemicals and in just one technological step. The purpose was to present study aimed to compare and evaluate *in vivo* the stability and osseointegration of dental implants with 2 different surfaces structured by ytterbium-doped pulsed fiber laser operating at 1064 nm.

Materials and methods. 60 dental implants were placed in the study. 2 types of dental implant surfaces, namely holes and parallel grooves, were created by the ytterbium laser operating at 1064 nm. A polished dental implant (without laser surface structuring) was also included in the experiment for comparison. The study was carried out on 15 laboratory animals (male rabbits, weight 3.5-4 kg). The implants were placed in the tibia. 4 implants with different surface types but of the same diameter and length were placed in each rabbit.

Results. Laboratory animals were sacrificed 1.5 and 3 months after the surgery. The stability of the implants was assessed by RFA (Resonance Frequency Analysis), based on the registration of resonance electromagnetic oscillations of the implant and the surrounding bone when they are exposed to the electromagnetic field (Osstell ISQ). Also, non-decalcified bone blocks were histologically examined using a confocal laser scanning microscope (Carl Zeiss LSM 780) and histomorphometry was performed (BIC-index: Bone-to-implant contact). Bone blocks were prepared according to a special technique: they were soaked and embedded into the plastic and synthetic resin. The obtained blocks were cut into sections, 40-50 μm thick, and stained with toluidine blue.

Conclusion. Laser surface structuring of the dental titanium implants is a promising technique. 59 in 60 (98.3%) implants were osseointegrated, there were no signs of inflammation in the bone tissue. The present results allow further studying of dental implants with various surface designs, structured by ytterbium laser.

Key words: dental implants, ytterbium pulsed fiber laser, laser surface structuring, osseointegration, animal study

For citation: A.I. Yaremenko, E.A. Zernitskaya, P.A. Zotov, Yu.Yu. Karlagina, E.E. Egorova, G.V. Odintsova. Experimental study of the Ti-implant surfaces structured by the ytterbium-doped pulsed fiber laser. *Parodontologiya*. 2021;26(2):88-95-88-95. (in Russ.) <https://doi.org/10.33925/1683-3759-2021-26-2-88-95-88-95>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в стоматологии удалось достичь высоких показателей остеоинтеграции дентальных имплантатов. В практике врача-стоматолога более важным и первостепенным является вопрос об обеспечении долговременного функционального и эстетического результата, нежели о физиологической интеграции дентального имплантата. Однако, по данным отечественной и зарубежной литературы [1], в 1-2% случаев может произойти дезинтеграция имплантатов на ранних послеоперационных сроках даже у здоровых пациентов и при правильном протоколе установки имплантата.

Успешность функционирования имплантата зависит от многих факторов, таких как соблюдение протокола операции хирургом-стоматологом и качественная гигиена ортопедической конструкции и полости рта в целом пациентом. Но большое значение также имеют и характеристики самого имплантата (макро- и микродизайн поверхности, тип соединения имплантата с супраструктурой и др.). Таким образом, повышение степени биосовместимости титановых дентальных имплантатов и срока их службы является актуальной проблемой.

В настоящее время существуют несколько основных методов структурирования поверхности дентальных имплантатов, однако наиболее популярным считается пескоструйная обработка [2]. Данный способ заключается в создании на поверхности имплантата хаотичного рельефа за счет попадания пескоструйного агента, которым обычно являются порошки гидроксиапатита, оксида алюминия и прочие. После данного этапа необходимо удаление остатков порошка с поверхности, поэтому в большинстве случаев применяется кислотное протравливание [3]. Поэтому данный метод является многоэтапным и не исключает вероятность остаточного загрязнения на поверхности.

Несколько лет назад компания Nobel Biocare презентовала новый тип поверхности имплантата под названием Ti Ultra [4]. Данный микродизайн поверхности имплантата имеет зоны с различной морфологией от шейки до апекса имплантата и оксидный слой на поверхности шейки имплантата и абатменте, который обеспечивает дополнительные бактерицидные свойства имплантату, что также подтверждает тот факт, что поиски идеальной поверхности дентального имплантата еще продолжаются.

Крайне перспективным методом структурирования поверхности дентальных имплантатов является лазерная обработка. Одной из компаний-производителей дентальных имплантатов, которые успешно применяют данный тип структурирования, является корейская фир-

ма CSM, применяющая излучение твердотельного Nd:YAG лазера. Благодаря данной технологии возможно создавать упорядоченный рельеф поверхности имплантатов, например, в виде канавок и лунок, без использования химических реагентов и всего за один технологический этап [5]. Поэтому можно сделать вывод, что методы на основе лазерного структурирования очень перспективны для создания микрорельефа дентальных имплантатов и показывают отличные результаты остеоинтеграции и функциональной стабильности.

Давно известно, что структурированность поверхности является одним из основных факторов, способствующих максимальному количеству костно-имплантационных контактов. Наиболее значимым показателем структуры поверхности является средняя глубина шероховатости. По данным некоторых исследований [6], наиболее рациональным является создание поверхности со значением этого показателя в диапазоне 20-40 мкм. Тогда такая структура будет обеспечивать двигательную активность клеток и возможность обмена веществ на поверхности дентального имплантата.

В настоящее время современные исследования эффективности и безопасности установки дентальных имплантатов невозможно проводить без качественного анализа взаимоотношений между дентальным имплантатом и воспринимающим ложем – окружающей костной тканью. Благодаря исследованию и изучению границы имплантат – костная ткань имеется возможность разработки оптимальных материалов, дизайна характера поверхности имплантатов.

Рядом авторов [7, 8] давно доказано, что получить гистологический препарат, содержащий одновременно титановый имплантат и прилегающую к нему кость, можно только с использованием специальных методов гистологической препаровки. Обычные гистологические методы заливки в парафин, целлоидин или поливакс не позволяют получить условия для создания гистологических срезов при наличии в блоке тканей титана. Специальные протоколы подготовки образцов заключаются в пропитке и заливке исследуемого материала в пластмассы и синтетические смолы, что продемонстрировано, например, в исследовании Calvo-Guirado и соавторов [9]. Данная техника позволяет получать 100–200-микронные первичные срезы, из которых далее можно получить гистологические срезы толщиной от 10 до 50 мкм.

Цель исследования – оценить стабильность и остеоинтеграцию дентальных имплантатов с различным дизайном поверхности, структурированной иттербиевым лазером.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для разработки технологии лазерного формирования морфологии поверхности титановых дентальных имплантов, оценки стабильности и остеоинтеграции дентальных имплантатов с различным дизайном поверхности, структурированной лазером, было выполнено экспериментальное исследование *in vivo* (протокол экспериментального исследования «*In vivo* исследование процессов интеграции титановых дентальных имплантатов с модифицированной лазером поверхностью» №208 от 25.06.2018). Исследование *in vivo* на лабораторных животных было выполнено на базе вивария ФГБОУ ВО «ПСПбГМУ им. И.П. Павлова» Минздрава России при участии факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники университета ИТМО, Санкт-Петербург и стоматологического фрезерного центра «ОПТОС», Санкт-Петербург.

Лазерное структурирование поверхности дентальных имплантатов производилось с помощью широко используемого в промышленности отечественного лазерного комплекса «МиниМаркер 2» на базе иттербиевого импульсного волоконного лазера (рис. 1).

В стоматологическом фрезерном центре «ОПТОС» были созданы дентальные титановые имплантаты в количестве 60 штук диаметром 3,5 мм и длиной 6 мм с внутренним коническим соединением и корневидным макродизайном. В качестве материала имплантата был выбран титановый сплав Ti-6Al-4V, который широко применяется в производстве дентальных имплантатов. Поверхность имплантатов не подвергалась какой-либо механической обработке в стоматологическом фрезерном центре (рис. 2).

После создания и упаковки имплантаты отправлялись в международную научную лабораторию лазерных микро- и нанотехнологий факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники Университета ИТМО (Санкт-Петербург) для проведения процедуры лазерного структурирования поверхности.

В исследовании произведен анализ морфологии поверхности методом сканирующей электронной микро-

скопии (СЭМ) (микроскоп Zeiss с дополнительными приставками Oxford Instruments INCAx-act). Сканирующая электронная микроскопия поверхности имплантатов была проведена в Санкт-Петербургском государственном университете в Междисциплинарном ресурсном центре по направлению «Нанотехнологии» (Санкт-Петербург). Произведен энергодисперсионный анализ и исследована смачиваемость поверхности дентальных имплантатов в международной научной лаборатории лазерных микро- и нанотехнологий факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники Университета ИТМО (Санкт-Петербург) [10].

Исследование *in vivo* проводилось на базе научно-исследовательского центра ФГБОУ ВО «ПСПбГМУ им. И.П. Павлова» Минздрава России с участием лабораторных животных. В качестве лабораторных животных использовались кролики самцы породы советская шиншилла в возрасте 1 год, весом от 4-5 кг. Всего в исследовании принимало участие 15 лабораторных животных. Исследование одобрено этическим комитетом ФГБОУ ВО «ПСПбГМУ им. И. П. Павлова» Минздрава России (протокол № 208 от 25.06.2018 г.).

В каждую большеберцовую кость кролика было установлено по два дентальных имплантата — один с Л-структурой, другой с К-структурой. Соответственно в каждое лабораторное животное было установлено по четыре дентальных имплантата (два с Л-структурой, два с К-структурой). Всего было установлено 60 имплантатов.

Оперативное вмешательство проводилось в условиях операционной лаборатории инвазивных технологий научно-исследовательского центра ФГБОУ ВО «ПСПбГМУ им. И. П. Павлова» Минздрава России. Во время хирургической процедуры животных предварительно подготавливали к премедикации (атропин п/к за 10-15 минут до премедикации в дозе 0,1 мг/кг), далее проводили премедикацию: рометар (торговое название «Ксила») п/к, в/м в дозе 4 мг/кг, кетамин п/к, в/м в дозе 10-15 мг/кг, дроперидол 0,25% р-р п/к, в/м в дозе 2,5 мг/кг. Через 10–15 минут проводилось внутривенное обезболивание. Для этого в ушную вену устанавливался внутривенный катетер размером 24 G. Далее производилось разведение в 10 мл 0,9% раствора хлорида натрия кетамина 50 мг, дроперидола 2,5 мг и ксилазина гидрохлорида 20 мг. Препараты вводили медленно до исчезновения ресничного, роговичного и pedalного рефлексов. Далее производилась интубация лабораторного животного.

Первым этапом было бритье зоны операции. Далее производилась медикаментозная обработка операционного поля (раствор октенисепт), выполнялась инфильтрационная анестезия раствором лидокаина 2% 2 мл.

Во время основной хирургической процедуры всем животным производился продольный разрез на обеих большеберцовых костях длиной 5-6 см (рис. 3).

Далее послойно отслаивались кожа с подкожно-жировой клетчаткой, расслаивались фасции с мышцами, отслаивалась надкостница (рис. 4).

Был использован физиодиспенсер (NSK Surgic AP с наконечником W&H WS-75 L G) с применением обязательного водяного охлаждения физиологическим раствором NaCl 0,9% (рис. 5).

Сформированы ложа под имплантаты размером 3,5 x 6 мм путем последовательной смены фрез (рис. 6).

Производилась установка имплантатов (рис. 7). Первичная стабилизация имплантатов оценивалась с использованием динамометрического ключа, и данные измерения вносились в таблицу.



Рис. 1. Процесс лазерного структурирования дентального имплантата на комплексе «МиниМаркер 2»
Fig. 1. Dental implant laser structuring using MiniMarker 2



Рис. 2. Вид дентального имплантата без механической обработки поверхности. До проведения лазерного структурирования.
Оптический снимок (слева), СЭМ-снимок (справа)
Fig. 2. A dental implant without mechanical surface treatment. Before laser structuring. Optical image (left), SEM-image (right)

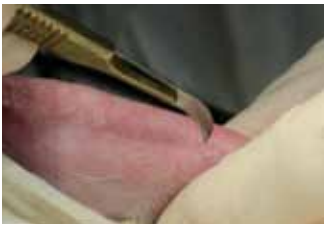


Рис. 3. Продольный разрез на большеберцовой кости кролика
Fig. 3. Longitudinal incision on the tibia of a rabbit



Рис. 4. Визуализирована большеберцовая кость кролика
Fig. 4. The tibia of a rabbit is exposed



Рис. 5. Формирование ложа под имплантаты путем последовательной смены фрез
Fig. 5. Implant bed preparation by consecutive change of burs



Рис. 6. Сформированы ложа под имплантаты
Fig. 6. Prepared implant beds



Рис. 7. Установлено два имплантата в большеберцовую кость
Fig. 7. Two implants placed in the tibia



Рис. 8. Послойное ушивание раны
Fig. 8. Layered closure



Рис. 9. Забор блоков костной ткани для гистологического и гистоморфометрического исследования
Fig. 9. Bone block harvesting for histological and histomorphometric examination

Далее рана промывалась раствором гентамицина (1 мл). Далее производилось послойное наложение швов материалом Vycril 5,0 и обработка кожных швов 5% спиртовым раствором йода (рис. 8).

Послеоперационный период протекал без особенностей, не было потерь среди лабораторных животных.

Кролики были случайным образом разделены на две группы (7 животных в первой группе и 8 животных во второй группе) и выведены из эксперимента через 1,5 месяца и 3 месяца после операции.

Эвтаназия выполнялась путем внутривенного введения раствора пентобарбитала натрия в дозировке 200 мг на 1 кг массы тела животного.

Сразу после выведения животного из эксперимента производилась оценка стабильности дентальных имплантатов методом частотно-резонансного анализа прибором Osstell ISQ. В процессе измерения в имплантат устанавливался специальный переходник SmartPeg. Он возбуждался магнитным импульсом от измерительного зонда. Резонансная частота, являясь мерой стабильности имплантата, рассчитывалась на основе ответного сигнала. На дисплей аппарата выводился коэффициент стабильности имплантата (КСИ) или Implant Stability Quotient (ISQ). Цифровой диапазон варьируется от 1 (минимальная стабильность) до 100 (максимальная стабильность). По данным производителя считается, что значения от 70 представляют собой высокие значения стабильности имплантата.

После измерения стабильности имплантата производился забор блоков костной ткани, содержащий в себе имплантат и окружающую костную ткань, для проведения гистологического и гистоморфометрического анализа. Забор блоков производился с использованием циркулярной фрезы с водяным охлаждением (рис. 9).

Далее производилась фиксация препарата в 10% растворе нейтрального формалина на 24-72 часа. После производилась дегидратация в серии спиртов с последовательным повышением концентрации от 70 до 100% каждые 15 минут.

Для проведения качественного гистологического и гистоморфометрического исследования необходимо было получить гистологический срез, который содержит в своем составе костную ткань и титановый имплантат. Это возможно сделать только с использованием специализированного метода работы с недекальцированной костной тканью. На базе Центра коллективного пользования научным оборудованием «Клеточные и молекулярные технологии изучения растений и грибов» Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН была произведена заливка и пропитка препарата специальной синтетической смолой (Technovit 7100®, Heraeus Kulzer, Wehrheim, Germany), которая используется по данным зарубежных исследований. Таким образом были получены полимеризационные блоки, содержащие имплантат с окружающей костной тканью.



Рис. 10. Получен срез толщиной менее 50 мкм
Fig. 10. The slice is thinner than 50 microns



Рис. 11. Препарат после окрашивания толуидиновым синим
Fig. 11. After toluidine blue staining

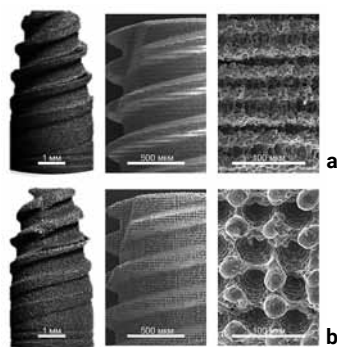


Рис. 12. а) Внешний вид дентального имплантата с К-структурой поверхности (по типу «канавки»); б) Внешний вид дентального имплантата с Л-структурой поверхности (по типу «лунки»). Оптические снимки (слева), СЭМ-изображения (по центру и справа)
Fig. 12. a) A dental implant with K-surface structure (groove-type). b) A dental implant with L-surface structure (hole-type). Optical images (left), SEM-images (center, right)

Из полученных блоков необходимо было получить высокоточные срезы толщиной не менее 50 мкм. Данная задача была выполнена с помощью специального оборудования на базе Института наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет. Были получены шлифы толщиной от 10 до 50 мкм (рис. 10).

Препарат окрашивался толуидиновым синим, так как данный краситель подходит для работы с декальцированной костной тканью (рис. 11).

Таким образом, получались препараты, готовые к гистологическому и гистоморфометрическому исследованию. Гистологическое исследование недекальцированной костной ткани производилось в ФГБУ «НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена» Минздрава России на лазерном сканирующем конфокальном микроскопе (Carl Zeiss LSM 780).

Далее была проведена гистоморфометрия и высчитывались такие показатели остеоинтеграции имплантата как BIC-индекс (Bone implant contact), FIC-индекс (Fibrous implant contact).

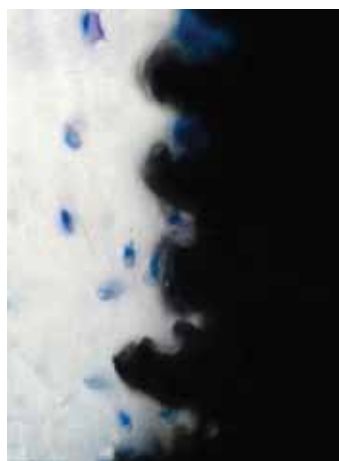


Рис. 14. Гистологическое исследование имплантата с К-структурой на сроке 3 месяца после операции, увеличение x40
Fig. 14. Histological examination of a K-structured implant, 3 months after surgery, magnification x40

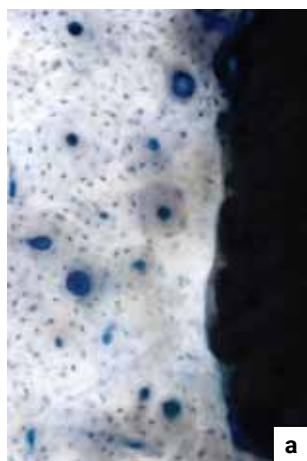


Рис. 15. Гистологическое исследование имплантата с Л-структурой на сроке 3 месяца после операции, а — увеличение x20, б — увеличение x40
Fig. 15. Histological examination of an L-structured implant, 3 months after surgery, a — magnification x 20, b — magnification x40

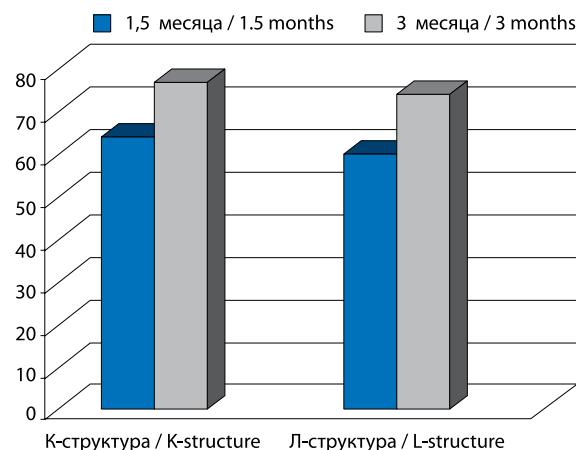


Рис. 13. Результаты измерения стабильности имплантатов с разными поверхностями на сроке в 1,5 и 3 месяца
Fig. 13. Results of the stability test of different implant surfaces, 1.5 and 3 months after surgery

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящем исследовании были сформированы структуры двух типов: лунки (Л-структура) и канавки (К-структура). На рисунке 12 приведены оптические снимки и СЭМ-снимки имплантатов после лазерной обработки: К-структура (рис. 12а) и Л-структура (рис. 12б). Период, ширина и глубина структур составила от 20 до 40 мкм — достаточно для размещения клеток подобно лакунам в остеоне.

Сразу после выведения животного из эксперимента производилась оценка стабильности дентальных имплантатов методом частотно-резонансного анализа прибором Osstell ISQ. На сроке в 1,5 месяца после операции среднее значение показателя стабильности дентальных имплантатов с К-структурой поверхности составляло 63,8, а на сроке в 3 месяца после операции — 76,8, что по данным производителя прибора считается хорошим показателем стабилизации имплантата. На сроке в 1,5 месяца после операции среднее значение

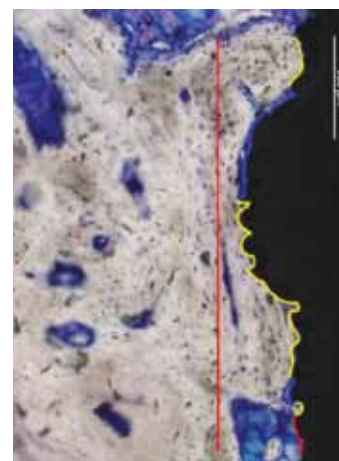


Рис. 16. В программном обеспечении Digimazer была построена линия контакта имплантат — кость и вычислена длина участка для проведения расчета BIC-индекса и FIC-индекса
Fig. 16. Implant-bone contact line was drawn and the length of the site was calculated for BIC (Bone-to Implant Contact) and FIC (Fibrous Implant Contact) indices using Digimazer software

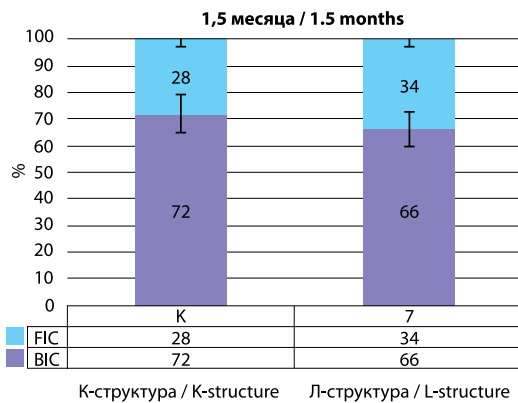


Рис. 17. BIC-индекс и FIC-индекс дентальных имплантатов с различным типом поверхностей на сроке в 1,5 месяца после операции

Fig. 17. BIC and FIC indices of dental implants with different types of surfaces, 1.5 months after surgery

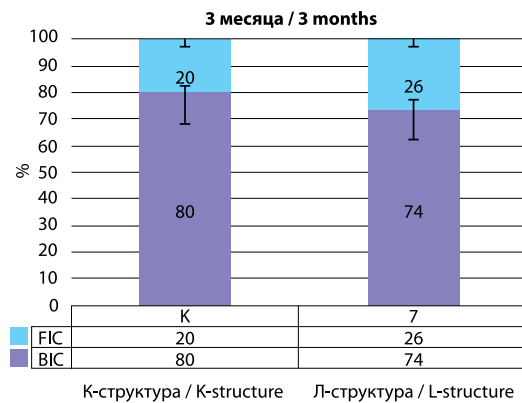


Рис. 18. BIC-индекс и FIC-индекс дентальных имплантатов с различным типом поверхностей на сроке в 3 месяца после операции

Fig. 18. BIC and FIC indices of dental implants with different types of surfaces, 3 months after surgery

показателя стабильности дентальных имплантатов с Л-структурой поверхности составляло 60,5, а на сроке в 3 месяца после операции — 74,2, что также является числовым значением хорошей стабилизации (рис. 13).

Гистологическое исследование недекальцинированной костной ткани производилось в ФГБУ «НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена» Минздрава России на лазерном сканирующем конфокальном микроскопе (Carl Zeiss LSM 780).

Гистологическое исследование препарата с Л-структурой поверхности представлено костным фрагментом со зрелыми остеоцитами, которые прилегают плотно у поверхности имплантата. Единичные остециты находятся в «лакунах» титана, сформированными лазерным микроструктурированием поверхности. По краям препарата имеются гаверсовы каналы нормальной структуры. Нет признаков воспаления (рис. 14).

Гистологическое исследование препарата с К-структурой поверхности представлено фрагментом зрелой пластинчатой кости с неравномерным расположением гаверсовых каналов, разных по диаметру, что говорит о прошедших перестроочных процессах в костной ткани. Фрагмент пластинчатой кости с равномерно расположенными остеоцитами. Хорошо контурируются отростки костных клеток, соединяющиеся друг с другом. В центре имеется один округлый заполненный кровью гаверсов канал (рис. 15).

Была проведена гистоморфометрия и высчитывались такие показатели остеоинтеграции имплантата, как BIC-индекс (Bone implant contact), FIC-индекс (Fibrous implant contact), количество клеток костной ткани — остеобластов (area of osteoblasts surface).

Для проведения расчета BIC-индекса и FIC-индекса в программном обеспечении Digimizer была построена линия контакта имплантат — кость и вычислена длина участка (рис. 16).

После этого в программном обеспечении ImageJ была рассчитана площадь и количество остеобластов.

На сроке 1,5 месяца после операции BIC-индекс дентальных имплантатов с К-структурой поверхности составлял 72%, а BIC-индекс дентальных имплантатов с Л-структурой поверхности — 66%. На сроке в 1,5 месяца после операции FIC-индекс дентальных имплантатов с К-структурой поверхности составил 28%, а

FIC-индекс дентальных имплантатов с Л-структурой — 34% (рис. 17).

На сроке 3 месяца после операции BIC-индекс дентальных имплантатов с К-структурой поверхности составлял 80%, а BIC-индекс дентальных имплантатов с Л-структурой поверхности — 74%. На сроке 3 месяца после операции FIC-индекс дентальных имплантатов с К-структурой поверхности составил 20%, а FIC-индекс дентальных имплантатов с Л-структурой — 26% (рис. 18).

ВЫВОДЫ

1. Лазерное структурирование поверхности дентальных имплантатов является перспективным методом обработки. 59 имплантатов из 60 (98,3%) были интегрированы. В костной ткани не обнаружено признаков воспаления.

2. Наилучшие результаты показала поверхность со структурой «канавка» (К-структура) по RFA и BIC анализу.

3. Возможности использования лазерных технологий в целях улучшения качества титановых имплантатов далеко еще не исчерпаны. Поиск оптимальных морфологий поверхности, сочетание гидрофильных и гидрофобных участков на ней, наряду с использованием новых материалов, способны обеспечить дальнейший устойчивый прогресс в этой области.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-62-46045).

Благодарность

Авторы работы выражают благодарность фрезерному центру «Ортос» за предоставление дентальных имплантатов, Демченко К. Н., заведующему Центром коллективного пользования научным оборудованием «Клеточные и молекулярные технологии изучения растений и грибов» Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН за помощь в подготовке препаратов недекальцинированной костной ткани, сотрудникам института наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет за помощь в получении срезов для гистологического исследования и Анисимовой Л. О., научному сотруднику ФГБУ «НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена» Минздрава России за проведение гистоморфометрического исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Albrektsson T, Wennerberg A. On osseointegration in relation to implant surfaces. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*. 2019;21:4-7.
<https://doi.org/10.1111/cid.12742>.
2. Velasco-Ortega E, Alfonso-Rodríguez CA, Monsalve-Guil L, EspañaLópez A, Jiménez-Guerra A, Garzón I, Alaminos M, Gil FJ. Relevant aspects in the surface properties in titanium dental implants for the cellular viability. *Materials Science and Engineering*. 2016;64:1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.03.049>.
3. Jemat A, Ghazali MJ, Razali M, Otsuka Y. Surface Modifications and Their Effects on Titanium. *Dental Implants. Biomed Research International*. 2015;3:1-11.
<https://doi.org/10.1155/2015/791725>.
4. Milleret V, Lienemann PS, Gasser A, Bauer S, Ehrbar M, Wennerberg A. Rational design and in vitro characterization of novel dental implant and abutment surfaces for balancing clinical and biological needs. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*. 2019;21:15-24.
<https://doi.org/10.1111/cid.12736>.
5. Lee JT, Cho SA. Biomechanical evaluation of laser-etched Ti implant surfaces vs. chemically modified SLA Ti implant surfaces: Removal torque and resonance frequency analysis in rabbit tibias. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2016;61:299-307.
<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.03.034>.
6. Simitzi C, Ranella A, Stratakis E. Controlling the morphology and outgrowth of nerve and neuroglial cells: The effect of surface topography. *Acta biomaterialia*. 2017;51:21-52.
<https://doi.org/10.1016/j.actbio.2017.01.023>.
7. Волков АВ. Гистоморфологические исследования взаимоотношений костной ткани с дентальным имплантатом. *Биомедицина*. 2012;4:96-100. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/gistomorfologicheskie-issledovaniya-vzaimootnosheniy-kostnoy-tkani-s-dentalnym-implantatom>.
8. Волков АВ, Смбалян БС, Назарян ДН, Мураев АА. Новая морфометрическая номенклатура для оценки остеоинтеграции внутрикостных имплантатов. *Современные технологии в медицине*. 2018;10(3):7-13.
<https://doi.org/10.17691/stm2018.10.3.1>.
9. Calvo-Guirado JL, Perez-Albacete Martínez C, Negri B, Delgado-Ruiz R. Mechanical, histological and histomorphometric evaluation of modified by femtosecond laser zirconia implants versus titanium implants. An experimental study in dogs at three months. *Journal of Osseointegration*. 2013;5(2):19-26.
<https://doi.org/10.23805/jo.2013.05.02.01>.
10. Вейко ВП., Карлагина ЮЮ., Романов ВВ., Яцук РМ., Егорова ЕЕ, Зерницкая ЕА., Яременко АИ., Черненко ГН., Горный СГ., Одинцова ГВ. Лазерная технология структурирования поверхности дентальных титановых имплантатов. *Фотоника*. 2020;5(14):462-472.
<https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.5.462.472>.

REFERENCES

1. Albrektsson T, Wennerberg A. On osseointegration in relation to implant surfaces. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*. 2019;21:4-7.
<https://doi.org/10.1111/cid.12742>.
2. Velasco-Ortega E, Alfonso-Rodríguez CA, Monsalve-Guil L, EspañaLópez A, Jiménez-Guerra A, Garzón I, Alaminos M, Gil FJ. Relevant aspects in the surface properties in titanium dental implants for the cellular viability. *Materials Science and Engineering*. 2016;64:1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.03.049>.
3. Jemat A, Ghazali MJ, Razali M, Otsuka Y. Surface Modifications and Their Effects on Titanium. *Dental Implants. Biomed Research International*. 2015;3:1-11.
<https://doi.org/10.1155/2015/791725>.
4. Milleret V, Lienemann PS, Gasser A, Bauer S, Ehrbar M, Wennerberg A. Rational design and in vitro characterization of novel dental implant and abutment surfaces for balancing clinical and biological needs. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*. 2019;21:15-24.
<https://doi.org/10.1111/cid.12736>.
5. Lee JT, Cho SA. Biomechanical evaluation of laser-etched Ti implant surfaces vs. chemically modified SLA Ti implant surfaces: Removal torque and resonance frequency analysis in rabbit tibias. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2016;61:299-307.
<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.03.034>.
6. Simitzi C, Ranella A, Stratakis E. Controlling the morphology and outgrowth of nerve and neuroglial cells: The effect of surface topography. *Acta biomaterialia*. 2017;51:21-52.
<https://doi.org/10.1016/j.actbio.2017.01.023>.
7. Volkov AV. Histomorphological researches of relationship of a bone with dental implant. *Biomedicina*. 2012;4:96-100. (In Russ.). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/gistomorfologicheskie-issledovaniya-vzaimootnosheniy-kostnoy-tkani-s-dentalnym-implantatom>.
8. Volkov AV, Smbatyan BS, Nazaryan DN, Muraev AA. A novel morphometric nomenclature to evaluate osseointegration of intraosseous implants. *Sovremennye tehnologii v medicine*. 2018;10(3):7-13. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17691/stm2018.10.3.1>.
9. Calvo-Guirado JL., Perez-Albacete Martínez C, Negri B, Delgado-Ruiz R. Mechanical, histological and histomorphometric evaluation of modified by femtosecond laser zirconia implants versus titanium implants. An experimental study in dogs at three months. *Journal of Osseointegration*. 2013;5(2):19-26.
<https://doi.org/10.23805/jo.2013.05.02.01>.
10. Veiko VP, Karlagina YuYu, Romanov VV, Yatsuk RM, Egorova EE, Zernitskaya EA, Yaremenko AI, Chernenko GN, Gorny SG, Odintsova GV. Laser Technology for Structuring the Surface of Dental Titanium Implants. *Photonics*. 2020;5(14):462-472 (In Russ.).
<https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.5.462.472>.

Конфликт интересов:

Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов/

Conflict of interests:

The authors declare no conflict of interests

Поступила / Article received 11.12.2020

Поступила после рецензирования / Revised 20.01.2021

Принята к публикации / Accepted 12.02.2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Автор, ответственный за связь с редакцией:

Зерницкая Екатерина Александровна, аспирант кафедры стоматологии хирургической и челюстно-лицевой хирургии Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. акад. И.П. Павлова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для переписки: zernitskaya_ekaterina@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3819-693X>

Яременко Андрей Ильич, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой стоматологии хирургической и челюстно-лицевой хирургии Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. акад. И.П. Павлова, президент Российской пародонтологической ассоциации, президент Стоматологической ассоциации Санкт-Петербурга, главный стоматолог Санкт-Петербурга, Санкт-Петербург, Российская Федерация

E-mail: ayaremenko@me.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7700-7724>

Зотов Павел Андреевич, ординатор кафедры стоматологии хирургической и челюстно-лицевой хирургии Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. акад. И.П. Павлова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

E-mail: pavelzotov98@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5440-1000>

Карлагина Юлия Юрьевна, инженер, Международная научная лаборатория лазерных микро- и нанотехнологий, аспирант факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники, Университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: jujukarlagina@itmo.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6927-9551>

Егорова Елена Евгеньевна, инженер, Международная научная лаборатория лазерных микро- и нанотехнологий, факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники, Университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: elena1998959@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1461-0673>

Одинцова Галина Викторовна, кандидат технических наук, научный сотрудник, Международная научная лаборатория лазерных микро- и нанотехнологий, Университет информационных технологий, механики и оптики, факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: gvodintsova@itmo.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9581-4290>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Corresponding author:

Ekaterina A. Zernitskaya, MD, PhD-student of the Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Pavlov First St. Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, Russian Federation

For correspondence: zernitskaya_ekaterina@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3819-693X>

Andrei I. Yaremenko, Dr. Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Pavlov First St. Petersburg State Medical University, president of Russian Dental Association, president of Saint Petersburg Dental Association, Saint Petersburg Chief Dentist, Saint Petersburg, Russian Federation

E-mail: ayaremenko@me.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7700-7724>

Pavel A. Zotov, MD, resident of the Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Pavlov First St. Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, Russian Federation

E-mail: pavelzotov98@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5440-1000>

Yulia Yu. Karlagina, engineer, International Scientific Laboratory «Laser Micro-and Nanotechnologies», PhD-student of school of laser photonics and optical electronics University of Information Technology, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russian Federation

E-mail: jujukarlagina@itmo.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6927-9551>

Elena E. Egorova, engineer, International Scientific Laboratory «Laser Micro- and Nanotechnologies», school of laser photonics and optical electronics, University of Information Technology, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russian Federation

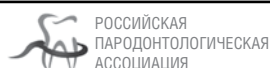
E-mail: elena1998959@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1461-0673>

Galina V. Odintsova, PhD (Technical Sciences), Scientific Researcher, International Scientific Laboratory «Laser Micro- and Nanotechnologies», School of Laser Photonics and Optical Electronics, University of Information Technology, Mechanics and Optics, Saint-Petersburg, Russia.

E-mail: gvodintsova@itmo.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9581-4290>



ЖУРНАЛЫ ИЗДАТЕЛЬСКОЙ ГРУППЫ РПА

Журнал «Пародонтология»

Стоимость подписки в печатном виде на 2021 год по России – 2700 рублей

Подписной индекс в каталоге «Пресса России» – 18904

Стоимость подписки в электронном виде на 2021 год – 2500 рублей

www.parodont.ru