

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗУБНЫХ ИМПЛАНТАТОВ С РАЗВИТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

С. М. Геращенко, С. И. Геращенко, В. В. Карнаухов, М. В. Едемский

TECHNOLOGY OF CREATING INDIVIDUAL DENTAL IMPLANTS WITH A DEVELOPED SURFACE

S. M. Gerashchenko, S. I. Gerashchenko, V. V. Karnaukhov, M. V. Edemsky

Аннотация. *Предмет и цель работы.* Предложена технология создания индивидуальных зубных имплантатов (ИЗИ) на основе компьютерной обработки снимков конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ) в формате DICOM путем печати модели на 3D-принтере и создания развитой поверхности в виде микро- и макрокаверн на изделии методом лазерной обработки. Целью данного исследования является разработка технологии получения модели корней зуба (МКЗ) с учетом индивидуальных особенностей пациента на основе данных КЛКТ, 3D-печати изделия из титана и создание развитой поверхности на полученной модели. *Методы.* Технология создания ИЗИ включает в себя три последовательных этапа работы: создание МКЗ путем компьютерного моделирования изображения, полученного из КЛКТ-снимка пациента, 3D-печать полученной модели методом селективного лазерного спекания, лазерная обработка изделия с целью создания развитой поверхности. *Результаты.* Представлены результаты создания имплантата, идентичного корневой части удаленного зуба пациента и описан способ создания развитой поверхности на полученном изделии. *Выводы.* Использование имплантата, создаваемого по предложенной технологии, с учетом индивидуальных особенностей пациента и развитой поверхностью в виде микро- и макрокаверн, позволит значительно снизить риск травматизации во время установки имплантата и увеличить степень его приживаемости.

Ключевые слова: зубной имплантат, 3D-моделирование, 3D-печать, развитая поверхность.

Abstract. *Subject and goals.* The article presents the technology for creating individual dental implants (IDI) by computer processing of images of a cone-beam computed tomography (CBCT) in the DICOM format, printing a model on a 3D printer and creating a developed surface in the form of micro- and macrocavities on the product using laser processing method. The purpose of this study is to develop a technology for obtaining a tooth root model (TRM) taking into account the patient's individual characteristics based on CBCT data and 3D printing of a titanium product and the creation of a developed surface on the resulting model. *Methods.* The technology of creating an IDI includes 3 stages of work: the creation of an TRM by computer simulation of an image obtained from a CBCT patient image, 3D printing of the resulting model using selective laser sintering, laser processing of the product to create a developed surface. *Results.* The article presents the results of creating a TRM identical root part of the extracted tooth, and describes how to create a developed surface on the resulting product. *Conclusions.* Using of the implant, created by the proposed technology, taking into account the individual characteristics of the patient and the developed surface in the form of micro- and macrocavities, will significantly reduce the risk of injury during the implant installation and increase the survival rate.

Keywords: dental implant, 3D-modeling, 3D-printing, developed surface.

Введение

Настоящее время характеризуется активным внедрением цифровых технологий, в том числе и систем автоматизированного проектирования (CAD), в различные области медицины. В стоматологии активно ведутся исследования по применению цифровых методов визуализации, позволяющих формировать трехмерные модели строения элементов челюсти и зубов пациента.

Объем производства стоматологических имплантатов в России увеличивается с каждым годом. По состоянию на 2018 г. объем рынка дентальных имплантатов в России составил более 590 тыс. шт. в количественной оценке и более 80 млн долларов – в стоимостном исчислении. Согласно расчетам по прогностическим моделям, ожидаемый объем рынка к 2020 г. оценивается в диапазоне 0,8–1 млн шт. при нахождении стоимостного эквивалента объемов в пределах от 100 до 130 млн долларов. Согласно выводам Министерства здравоохранения Российской Федерации, в ближайшие годы ожидается рост объемов производства в сфере стоматологии не менее чем на 12 % в год. В своих доводах эксперты ссылаются на повышенное качество услуг, сервис при отсутствии очередей, активное продвижение услуг всеми доступными средствами.

Вживление титанового имплантата в десну на место отсутствующего зуба – один из прогрессивных и эффективных способов устранения ряда стоматологических дефектов. Если пациент нуждается в имплантации и у него сохранилась конфигурация корневой части удаляемого зуба, нет противопоказаний к установке имплантата, то восстановить функцию челюсти можно по предлагаемой технологии путем установки зубного имплантата с развитой поверхностью, изготовленного с учетом геометрических размеров корня зуба пациента, что обеспечит минимальную травматизацию при имплантации и ускоренную приживаемость имплантата на месте установки.

В данной работе предложена технология создания ИЗИ путем разработки индивидуальных МКЗ, применения 3D-печати методом селективного лазерного спекания и создания развитой поверхности в виде микро- и макрокаверн на изделии методом лазерной обработки.

Обзор литературы

Применение технологии создания ИЗИ с развитой поверхностью предполагает отсутствие химических реагентов в изготавливаемом имплантате, а также минимальную травматизацию естественной конфигурации челюсти человека. Среди современных исследований в данной области можно выделить:

– в рамках исследования «Influence of scanning and reconstruction parameters on quality of three-dimensional surface models of the dental arches from cone beam computed tomography» [1] проводилось изучение влияния поля сканирования, размера вокселя и пороговых значений сегментации на качество трехмерных (3D) моделей поверхности зубных дуг из конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ);

– в статье «3D modeling, custom implants and its future perspectives in craniofacial surgery» [2] описывается, что индивидуальные имплантаты, созданные после 3D-моделирования, для реконструкции черепно-лицевых де-

фектов благодаря лучшей остеоинтеграции и свойствам по сравнению с их обычными аналогами являются более продуктивными;

– в статье «3D printing in dentistry» [3] описываются основные доступные технологии 3D-печати и их различные виды применения в стоматологии и в челюстно-лицевой хирургии.

Материалы и методы

Предлагаемая технология создания ИЗИ с развитой поверхностью в виде микро- и макроаверн состоит из следующих этапов:

1. Создание МКЗ. Снимок челюсти пациента, полученный в результате выполнения КЛКТ (рис. 1) в формате DICOM импортируется в программу для создания хирургических шаблонов, где производилась первичная сегментация участка корня зуба. Полученный файл в формате STL далее переносится в программу для удаления артефактов, возникающих в процессе сегментации изображения.

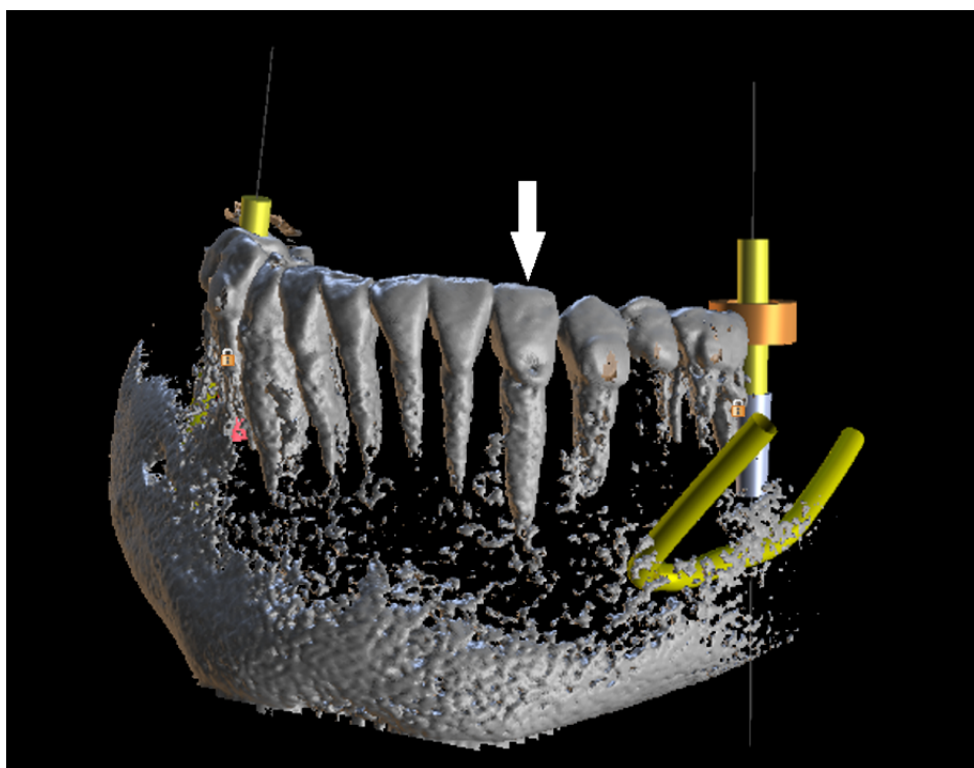


Рис. 1. Первичный снимок челюсти пациента
(стрелкой обозначен зуб для будущей сегментации)

2. 3D-печать. Полученная МКЗ, с учетом индивидуальных особенностей пациента, отправляется на 3D-печать из титанового порошка методом селективного лазерного спекания. Стоит отметить, что созданное в результате 3D-печати изделие не будет обладать достаточной первичной стабильностью после размещения в челюсти из-за отсутствия на поверхности имплантата микрошероховатостей.

3. С целью создания развитой поверхности имплантата в виде микро- и макрокаверн применяется метод лазерной обработки.

Положительный эффект создания микро- и макрокаверн достигается тем, что в имплантате для имплантации в костную ткань на внешней стороне поверхности по всей поверхности внутрикостной части имплантата с шагом L по ширине и длине выполнены отверстия в виде усеченного конуса, основание которого заглублено не менее чем на 40 мкм, причем отверстия выполнены лучом лазера путем поворота его на 360° под углом α к оси формируемого отверстия. Сущность предлагаемого решения поясняется общим видом поверхности имплантата с поперечным разрезом конусного отверстия, показанного на рис. 2 [4–5].

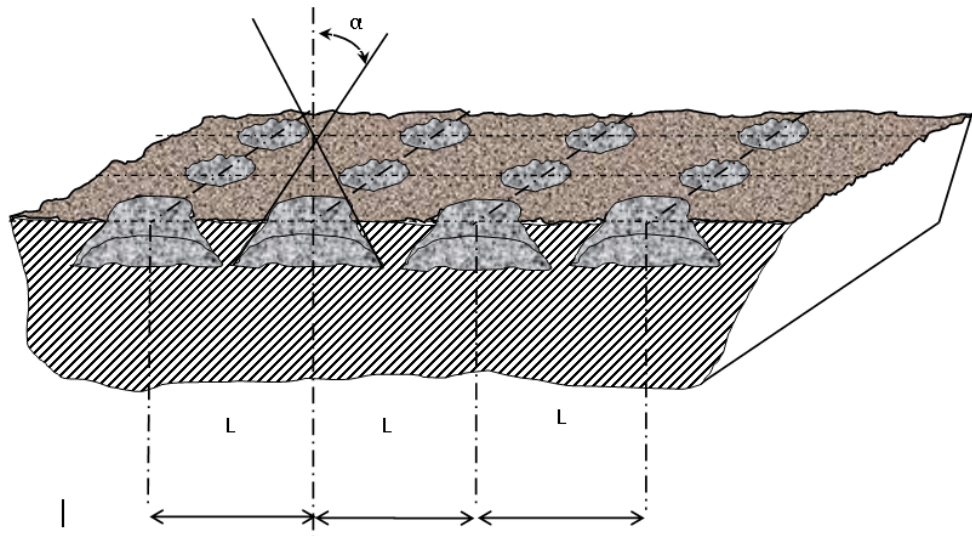


Рис. 2. Имплантат для имплантации в костную ткань

При установке имплантата в костное ложе достигается надежная фиксация внутрикостной части в результате формирования дополнительной силы, связанной с разрывом биоткани в момент физического воздействия, обусловленной поверхностью остеointеграционных элементов, выполненных в виде конусных отверстий, а также за счет большой площади контакта с костью, обусловленной микрошероховатостью поверхности имплантата, когда в пограничном имплантату пространстве стадийно формируются зрелые костные структуры. Кость постепенно интегрирует с развитым по схожести с ее микроархитектоникой рельефом имплантата, что приводит к образованию прочного соединения «костная ткань – имплантат» [4, 5].

Увеличение топографии поверхности изделия при использовании лазерной технологии осуществляется за счет ее модификации порами с целью улучшения интеграции имплантата с костной тканью [6].

Основными параметрами лазеров, которые определяют качество обработки, являются:

- мощность излучения P ;
- длина волны λ ;

- длительность импульса τ ;
- частота следования импульсов f ;
- пространственные характеристики модовой структуры излучения;
- расходимость пучка α .

Методика получения пористой структуры с использованием лазера основана на анализе гидродинамической и тепловой задачи процесса газолазерной резки с учетом возникновения волны и выноса расплава из зоны реза. Взаимодействие лазерного излучения с поверхностью обрабатываемого материала основано на теплофизическом воздействии, способном расплавить материал, довести его до кипения и частично испарить [6].

При этом следует отметить, что получение пористой структуры на титане под высоким давлением аргона позволяет получить ровную кромку пор с шероховатостью, определяемой перекрытием пятен воздействия лазерного излучения. Для чистовой обработки можно применять давление до 15 атм.

Мощность излучения лазера должна обеспечивать нагревание поверхности до температуры испарения $T_{\text{и}} \leq 10\,000\text{ К}$. Для такой температуры можно определить необходимую плотность мощности; при радиусе поперечного сечения пучка в фокальной плоскости 100 мкм она составляет примерно 0,1–1 кВт. Длина волны лазера должна лежать в спектральной области, где обрабатываемый материал имеет больший коэффициент поглощения.

Проведенные исследования режимов лазерной обработки показали, что одной из основных является задача получения образца с требуемой геометрией, с полным устранением облоя по всей области воздействия лазерного излучения. Для решения этой задачи использовалась газолазерная обработка с использованием аргона. В качестве образца использовался титановый стержень с квадратным сечением размером 1 мм. Лазерная резка проводилась с применением системы непрерывной подачи струи в 4 атм [7].

Результаты проведенной экспериментальной оценки режимов лазерной обработки подтвердили возможность создания развитой поверхности зубных имплантатов. Применяемая газолазерная технология позволяет формировать качественную структуру и форму рельефа пористой поверхности с заданными параметрами [6, 7].

Результаты

Для создания ИЗИ с развитой поверхностью в виде микро- и макрокаверн была произведена процедура сегментации МКЗ из КЛКТ-снимка пациента путем выделения из снимка корневой части зуба. По завершении работы сегментированный участок экспортируется в формате STL-файла для дальнейшей обработки и 3D-печати (рис. 3).

Далее производится обработка полученной МКЗ с целью заполнения дефектов, которые возникли в результате форматирования изображения, и удаление возникших при сегментации артефактов с помощью интерактивных инструментов программы. Результат обработки изображения представлен на рис. 4.

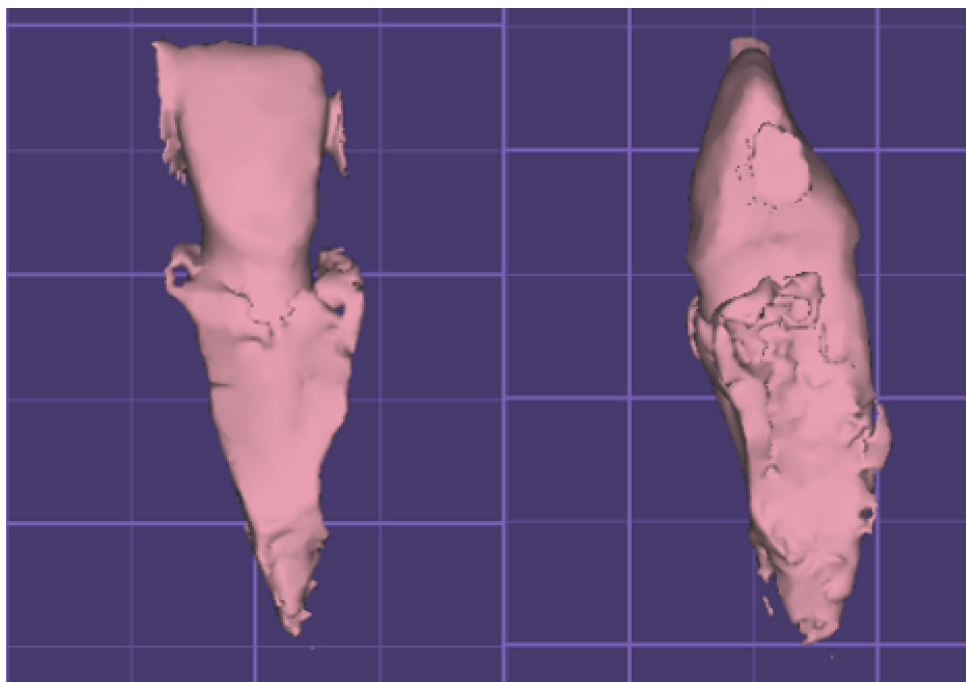


Рис. 3. Результат сегментации зуба

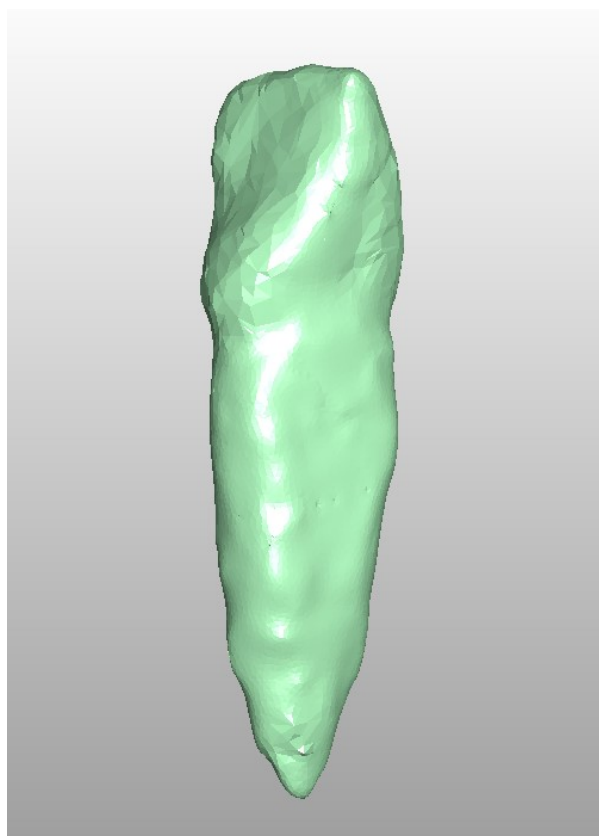


Рис. 4. 3D-модель корня зуба с учетом индивидуальных особенностей пациента

Полученная 3D-модель корня зуба используется для изготовления ИЗИ путем 3D-печати из титанового порошка методом селективного лазерного спекания. Создание развитой поверхности в виде микро- и макроаверн производится методом лазерной обработки. Технология с одновременным применением лазерного излучения и газовой струи является одной из самых эффективных с точки зрения качества обработки материалов [6].

В результате получается создать поверхность ИЗИ с высокой точностью воспроизведения геометрических размеров формируемых пор. Внешний вид изделия после создания развитой поверхности представлен на рис. 5.



Рис. 5. Внешний вид изделия после обработки поверхности

Обсуждение

Для создания ИЗИ требуется 3D-модель зуба, формируемая на основе КЛКТ. Корневая область зуба пациента должна быть неповрежденной.

Показаниями для имплантации по предложенной технологии являются наличие у пациентов следующих форм заболеваний:

1. Вертикальная фрактура корня зуба (ВФК) – заболевание, как правило, обнаруживается в ранее эндодонтически леченных зубах, и удаление зуба с ВФК является методом выбора в исходе данной патологии. При данной патологии представляется возможным создание модели ИЗИ по предлагаемой технологии с дальнейшим восстановлением функции челюсти.

2. Хронический периодонтит – если при заболевании по данным инструментальной диагностики происходит умеренное расширение периодонтальной щели, невозможно провести консервативное лечение, например, при условии сильно разрушенной коронковой части зуба, то изготовление и установка ИЗИ является перспективным методом лечения.

3. Перелом зуба – продольный, оскольчатый и косой переломы корня зуба требуют удаления зуба. Установка ИЗИ, изготовленного по предлагаемой технологии, позволит восстановить функцию челюсти пациента.

4. Полный вывих зуба – если для реплантации зуба нет условий, то образовавшийся дефект зубного ряда возможно устранить путем установки ИЗИ с развитой поверхностью в виде микро- и макрокаверн.

Стоит отметить, при использовании метода одномоментной имплантации для установки ИЗИ, созданной по предлагаемой технологии, необходимо снизить нагрузку на область установленного имплантата на период первичного приживления и стабилизации. Решить данную проблему в дальнейшем планируется путем установки временной коронки и адгезивного моста в момент имплантации.

Добавление микро- и макрокаверн или объединение с методами модификации топографии поверхности имплантата приведут к ускоренной и более успешной остеоинтеграции по сравнению с необработанной поверхностью [8–10].

Выводы

В результате проведенного исследования предложена технология создания ИЗИ, воспроизводящего по форме и размеру корневую часть удаляемого зуба пациента, на основе комбинации компьютерной обработки снимков КЛКТ и технологий CAD, печати модели на 3D-принтере из титанового порошка методом селективного лазерного спекания с последующим созданием развитой поверхности в виде микро- и макрокаверн методом лазерной обработки. Имплантаты, созданные по предлагаемой технологии, имеют следующие преимущества:

1. Изготавливаются с учетом индивидуальных особенностей пациента и устанавливаются по методике одномоментной имплантации, что значительно снижает сроки приживления и реабилитации.

2. Поверхность имплантата в виде микро- и макрокаверн обеспечивает высокий уровень остеоинтеграции и, как следствие, сокращает время приживления.

3. Не будут деформировать естественную конфигурацию челюсти пациента, что приведет к снижению количества осложнений после имплантации.

Библиографический список

1. Influence of scanning and reconstruction parameters on quality of three-dimensional surface models of the dental arches from cone beam computed tomography / B. Hassan, P. Couto Souza, R. Jacobs, S. de Azambuja Berti, P. van der Stelt // Clin Oral Investig. – 2010. – Vol. 14(3). – P. 303–310. – DOI 10.1007/s00784-009-0291-3.
2. Parthasarathy, J. 3D modeling, custom implants and its future perspectives in craniofacial surgery / J. Parthasarathy // Ann Maxillofac Surg. – 2014. – Vol. 4(1). – P. 9–18. – DOI 10.4103/2231-0746.133065.
3. Dawood, A. 3D printing in dentistry / A. Dawood, B. Marti Marti, V. Sauret-Jackson, A. Darwood // BDJ. – 2015. – 219. – P. 521–529. – DOI 10.1038/sj.bdj.2015.914.
4. Патент 127617 Российская Федерация, МПК А 61 С 8/00. Зубной имплантат / Герашенко С. И., Евдокимов С. В., Митрошин А. Н., Фандеев В. П. ; № 2012156743/14 ; заявл. 25.12.2012 ; опубл. 10.05.2013, Бюл. № 13.
5. Патент 111423 Российская Федерация, МПК А 61 С 8/00. Зубной имплантат / Герашенко С. И., Герашенко С. М., Митрошин А. Н., Недорезов В. Г. ; 2011134892/14 ; заявл. 19.08.2011, опубл. 20.12.2011, Бюл. № 35.

6. Formation of the porous structure of material surface using the method of laser processing / A. N. Mitroshin, S. I. Gerashchenko, S. M. Gerashchenko, N. N. Yankina, A. V. Vertaev // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. – 2015. – № 6 (1). – P. 1869–1874.
7. Mitroshin, A. N. Experimental Evaluation of the Modes of Laser Processing Of the Surface of Implants and Prostheses / A. N. Mitroshin, S. I. Gerashchenko, S. M. Gerashchenko et al. // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. – 2015. – Vol. 6, № 1. – P. 1862–1868.
8. Препарирование изображений процесса формирования костного регенерата при настройке сканирующих электронных микроскопов / С. И. Геращенко, С. М. Геращенко, С. Ю. Костенков, Н. Н. Янкина, В. В. Карнаухов // *Надежность и качество сложных систем*. – 2016. – № 4 (16). – С. 82–91.
9. Анализ остеоинтеграции модифицированной лазерной поверхности титановых имплантатов, обработанных линейно-цепочечным углеродом / А. Н. Митрошин, Д. В. Никишин, Д. В. Смоленцев, М. А. Ксенофонтов, Д. А. Космынин // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки*. – 2016. – № 3 (39). – С. 5–15.
10. Сравнительная оценка остеоинтеграции винтовых конических и цилиндрических титановых имплантатов, обработанных методом микродугового оксидирования / А. Н. Митрошин, П. В. Иванов, А. Е. Розен, И. А. Казанцев, М. А. Розен, В. В. Розен // *Фундаментальные исследования*. – 2011. – № 9 (3). – С. 447–451.

References

1. Hassan B., P. Couto Souza, Jacobs R., de Azambuja Berti S., van der Stelt P. *Clin Oral Investig*. 2010, vol. 14(3), pp. 303–310. DOI 10.1007/s00784-009-0291-3.
2. Parthasarathy J. *Ann Maxillofac Surg*. 2014, vol. 4 (1), pp. 9–18. DOI 10.4103/2231-0746.133065.
3. Dawood A., Marti Marti B., Sauret-Jackson V., Darwood A. *BDJ*. 2015, 219, pp. 521–529. DOI 10.1038/sj.bdj.2015.914.
4. Patent 127617 Russian Federation, MPK A 61 S8/00. *Zubnoy implantat* [Patent 127617 Russian Federation, IPC A 61 S8/00. Dental implant]. Ge-rashchenko S. I., Evdokimov S. V., Mitroshin A. N., Fandeev V. P.; no. 2012156743/14; appl. 25.12.2012; publ. 10.05.2013, bull. no. 13. [In Russian]
5. Patent 111423 Russian Federation, MPK A 61 C 8/ 00. *Zubnoy implantat* [Patent 111423 Russian Federation, IPC A 61 C 8/ 00. Dental implant]. Ge-rashchenko S. I., Gerashchenko S. M., Mitroshin A. N., Nedorezov V. G.; 2011134892/14; appl. 19.08.2011, publ. 20.12.2011, bull. no. 35. [In Russian]
6. Mitroshin A. N., Gerashchenko S. I., Gerashchenko S. M., Yankina N. N., Vertaev A. V. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2015, no. 6 (1), pp. 1869–1874.
7. Mitroshin A. N., Gerashchenko S. I., Gerashchenko S. M. et al. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2015, vol. 6, no. 1, pp. 1862–1868.
8. Gerashchenko S. I., Gerashchenko S. M., Kostenkov S. Yu., Yankina N. N., Karnaukhov V. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 4 (16), pp. 82–91. [In Russian]
9. Mitroshin A. N., Nikishin D. V., Smolentsev D. V., Ksenofontov M. A., Kosmynin D. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Meditsinskiye nauki* [University proceedings. Volga region. Medical sciences]. 2016, no. 3 (39), pp. 5–15. [In Russian]
10. Mitroshin A. N., Ivanov P. V., Rozen A. E., Kazantsev I. A., Rozen M. A., Rozen V. V. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental study]. 2011, no. 9 (3), pp. 447–451. [In Russian]

Геращенко Сергей Михайлович

доктор технических наук, профессор,
кафедра медицинской кибернетики
и информатики,
заместитель директора
Медицинского института,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: gsm@pnzgu.ru

Gerashchenko Sergey Mikhailovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of medical cybernetics
and computer science,
deputy director of Medical Institute,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Геращенко Сергей Иванович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой медицинской
кибернетики и информатики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mpo@list.ru

Gerashchenko Sergey Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of medical
cybernetics and computer science,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Карнаухов Виктор Вячеславович

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tempercore@mail.ru

Karnaukhov Viktor Vyacheslavovich

student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Едемский Михаил Вячеславович

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: misha.f.2015@mail.ru

Edemsky Mikhail Vyacheslavovich

student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Геращенко, С. М. Технология создания индивидуальных зубных имплантатов с развитой поверхностью / С. М. Геращенко, С. И. Геращенко, В. В. Карнаухов, М. В. Едемский // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2019. – № 1-2 (29-30). – С. 129–138.