



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-1-34-39>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 616.314.26-007.24/.615.841/615.843

УСКОРЕНИЕ ОСТЕОИНТЕГРАЦИИ ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ СЛАБЫМ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

А. А. ОСТАПОВИЧ¹, С. В. ИВАШЕНКО¹, И. И. ШПАК²

¹Белорусский государственный медицинский университет (г. Минск, Республика Беларусь)

²Институт информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2025
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2025

Аннотация. Повысить качество лечения пациентов с применением дентальных имплантатов возможно за счет усиления соединения кость–дентальный имплантат слабым постоянным током. В процессе проведения эксперимента *in vitro* использовались титановые электроды, имитирующие дентальные имплантаты. Электроды помещали в забранную венозную кровь человека. В опытной группе в течение 10 мин проводили физиопроцедуры с помощью разработанного устройства при силе тока 15–20 мкА. В контрольной группе титановые пластины помещали в кровь без электрического тока на 10 мин. В исследуемых образцах изучали плотность прилегания кровяных сгустков к титановым пластинам, толщину кровяных сгустков, число тромбоцитов и эритроцитов. Установлено, что воздействие электрическим током силой 15–20 мкА на кровяной сгусток через титановые пластины способствует утолщению и уплотнению кровяных сгустков на поверхности электродов. В кровяном сгустке увеличивается число эритроцитов и тромбоцитов, что способно оказать положительный эффект на процесс остеоинтеграции.

Ключевые слова: постоянный ток, слабый ток, дентальный имплантат, остеоинтеграция, тромбоциты, агрегация, кровяной сгусток.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Остапович, А. А. Ускорение остеоинтеграции дентальных имплантатов слабым постоянным током / А. А. Остапович, С. В. Ивашенко, И. И. Шпак // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 1. С. 34–39. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-1-34-39>.

OSSEOINTEGRATION ACCELERATION OF DENTAL IMPLANTS BY WEAK DIRECT CURRENT

ALEKSEY A. OSTAPOVICH¹, SERGEY V. IVASHENKO¹, IVAN I. SHPAK²

¹Belarussian State Medical University (Minsk, Republic of Belarus)

²Institute of Information Technologies of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. It is possible to improve the quality of treatment of patients using dental implants by strengthening the bone–dental implant connection with a weak direct current. Titanium electrodes simulating dental implants were used in the *in vitro* experiment. The electrodes were placed in collected human venous blood. In the experimental group, physiotherapy procedures were performed for 10 minutes using the developed device at a current of 15–20 μ A. In the control group, titanium plates were placed in blood without electric current for 10 minutes. In the studied samples, the adhesion density of blood clots to the titanium plates, the thickness of blood clots, the number of platelets and erythrocytes were studied. It was found that the effect of an electric current of 15–20 μ A

on a blood clot through titanium plates contributes to thickening and compaction of blood clots on the surface of the electrodes. The number of red blood cells and platelets in the blood clot increases, which can have a positive effect on the process of osseointegration.

Keywords: direct current, weak current, dental implant, osseointegration, platelets, aggregation, blood clot.

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

For citation. Ostapovich A. A., Ivashenko S. V., Shpak I. I. (2025) Osseointegration Acceleration of Dental Implants by Weak Direct Current. *Doklady BGUIR*. 23 (1), 34–39. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-1-34-39> (in Russian).

Введение

Дентальные имплантаты для восстановления функции утраченных зубов активно применяются в Республике Беларусь и мире. Данная методика стала доступной как для врачей, так и для пациентов. Однако лечение с использованием дентальных имплантатов по-прежнему длительное. С момента удаления зуба до установки коронки с опорой на дентальном имплантате проходит шесть и более месяцев. Также распространены отдаленные осложнения в виде отторжения дентальных имплантатов, когда нарушается плотность соединения кость–дентальный имплантат. Цель исследований авторов – повысить качество лечения пациентов с адентией с применением дентальных имплантатов.

Процесс соединения кости с дентальным имплантатом называют остеоинтеграцией. По сути, это последовательность регенеративных биологических процессов, протекающих в костной ткани вокруг дентального имплантата, который воспринимается организмом как инородное тело. Известно, что регенерация тканей и рост клеток обусловлены генетически. Также не представляется возможным ускорить процесс остеоинтеграции дентальных имплантатов [1]. Однако можно создать условия, при которых регенеративные процессы будут протекать качественнее и ближе к поверхности дентальных имплантатов, а также повысить плотность соединения кость–дентальный имплантат и сократить сроки остеоинтеграции. Такие условия возможно создать с помощью физических факторов, как, например, воздействие электрическим током.

Теоретический анализ

При рассмотрении процедуры остеоинтеграции дентальных имплантатов важны как биологические и физиологические, так и физическая составляющие данного процесса. Известно, что кость является пьезоэлектрическим материалом и обладает хорошей электропроводностью. Электрические импульсы стимулируют факторы, способствующие росту и заживлению костей. Существуют внешние стимуляторы, которые создают электрическое поле для ускорения заживления опосредованно, но идеальным решением является прямая стимуляция кости. Установка стимулирующих регенерацию устройств внутри организма требует оперативного вмешательства. Кроме того, эти устройства необходимо удалять после завершения регенерации, что также доставляет пациентам дискомфорт [2].

Современные дентальные имплантаты, имеющие цилиндрическую форму, вводятся в челюстную кость и не предполагают извлечения. Их изготавливают из медицинских сплавов титана. Наибольшее распространение получил сплав ВТ6 (по международному стандарту Grade 5Ti-6Al4V). Удельная электропроводность титана $42,1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, у алюминия – $2,5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м [3]. Таким образом, дентальный имплантат может быть электродом.

Во время операции дентальной имплантации в челюстной кости создается ложе для имплантата. При этом неизбежно нарушается целостность костной ткани, что приводит к кровотечению. Развивается реакция первичного гемостаза [3]. Образуется пленка из тромбоцитов, эритроцитов и лейкоцитов, которые заполняют пространство между костной тканью и поверхностью дентального имплантата. Именно тромбоциты выполняют защитную функцию, препятствуют развитию кровотечения в зоне повреждения. Тромбоциты, обладая отрицательным электрическим зарядом, устремляются к поврежденной поверхности костной ткани, которая приобретает положительный заряд. Также белок тромбоцитов имеет активные центры, соединяющиеся с другими активизированными тромбоцитами и коллагеном. Таким образом, тромбоциты связываются между собой и с участком поврежденной кости [3]. Происходит процесс адгезии и формирования кровяного

сгустка, который в течение последующих 10–15 мин уплотняется на поверхности поврежденной костной ткани и уменьшается в объеме до 10 % от первоначального размера. Далее тромбин, образовавшийся из тромбоцитов, инициирует создание фибриновых нитей, преобразующихся затем в коллагеновые волокна, на которых будет отстраиваться молодая костная ткань. Чем ближе к поверхности дентального имплантата будут протекать описанные процессы, тем прочнее будет соединение кость–дентальный имплантат.

Повлиять на агрегацию тромбоцитов, формирование и рост костной ткани можно воздействием электрического тока. Так, выполненный на крысах эксперимент показал, что постоянный электрический ток малой величины (10 мкА) вызывает усиление агрегации тромбоцитов, свертывания крови и фибринолиза у анода, приложенного к поверхности сосудистой стенки яремной вены. В области катода такой эффект практически отсутствовал. Установлено, что повышение свертываемости крови в ответ на действие постоянного электрического тока связано с выделением из стенки сосуда физиологически активных веществ, влияющих на эти процессы [1].

На экспериментальной модели повреждения бедренной кости в области тазобедренного сустава изучали влияние низкочастотной электростимуляции зоны повреждения на скорость регенерации кости. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности электростимуляции токами низкой частоты при восстановлении костной ткани после повреждения [4]. Также разработано тонкое и гибкое устройство с автономным питанием, которое интегрируют к кости в область перелома. Устройство воздействует на кость слабым электрическим током. В последующем оно самостоятельно растворяется и безопасно выводится из организма, как только дефект кости восстанавливается. Проведенные эксперименты на крысах подтвердили, что устройство действительно генерирует электрическую энергию около 4 В, которая может сохраняться более шести недель [5].

Е. Н. Овчинников и М. В. Стогов [4] изучали прямое воздействие постоянного тока на кость. Технология заключается в том, что к месту перелома кости имплантируется электрод, являющийся катодом. Анод размещают на коже над местом перелома. Используемые параметры тока – от 5 до 100 мкА.

Во всех перечисленных исследованиях продемонстрировано, что использование имплантируемых изделий в качестве катода может быть перспективным вариантом для стимуляции процессов остеогенеза. Существенным плюсом такого подхода является то, что при нем снижается вероятность инфицирования применяемых в качестве электродов имплантированных изделий. Это происходит за счет создаваемого на них электрическим током антимикробного эффекта. Согласно исследованиям, применение имплантатов в качестве катодов для электростимуляции не менее эффективно, чем использование специальных приборов для прямой электростимуляции. Повышается безопасность технологии, поскольку отсутствует необходимость дополнительной инвазии при имплантации катода, а также снижаются риски инфицирования имплантируемых металлических изделий [4].

Результаты исследований и их обсуждение

Изучив теоретические особенности остеоинтеграции дентальных имплантатов, авторы предлагают устройство, генерирующее слабый постоянный электрический ток для улучшения соединения кость–дентальный имплантат. Для подтверждения эффективности данного устройства на базе НИЧ Белорусского государственного медицинского университета выполнен эксперимент *in vitro*. В процессе исследований использовались титановые (GRADE 4) катод и анод, которые имитировали дентальные имплантаты. Электроды помещали в забранную венозную кровь человека. В каждой группе исследовалось пять образцов. В опытной группе аппарат включали на 10 мин при силе тока 15–20 мкА, в контрольной титановые пластины помещали в кровь без электрического тока на 10 мин. Учет результатов проводился посредством анализа микрофотографий (рис. 1, 2), полученных при помощи сканирующей электронной микроскопии. В исследуемых образцах контрольной и опытной групп изучались плотность прилегания кровяных сгустков к титановым пластинам, толщина кровяных сгустков, число тромбоцитов и эритроцитов. Результаты обрабатывались с помощью прикладных программ Statistica 6.0 и Microsoft Excel с вычислением медианы, верхнего и нижнего квартилей, U-критериев достоверности Манна – Уитни, вероятности достоверности сравниваемых величин p . Различия рассматривались как достоверные при $p < 0,05$.

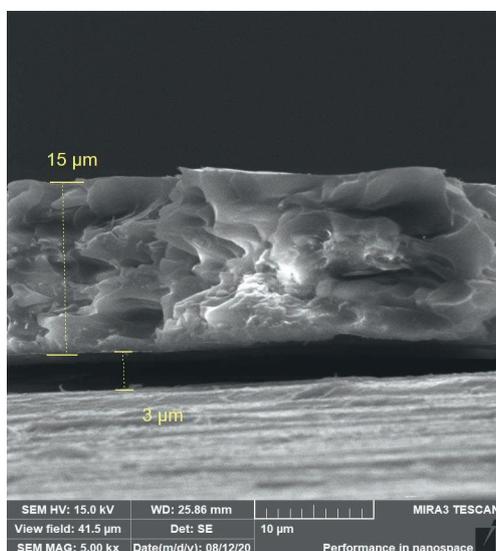


Рис. 1. Электронная микроскопия образца контрольной группы; кровяной сгусток отстоит от электрода
Fig. 1. Electron microscopy of the control group sample; the blood clot is separated from the electrode

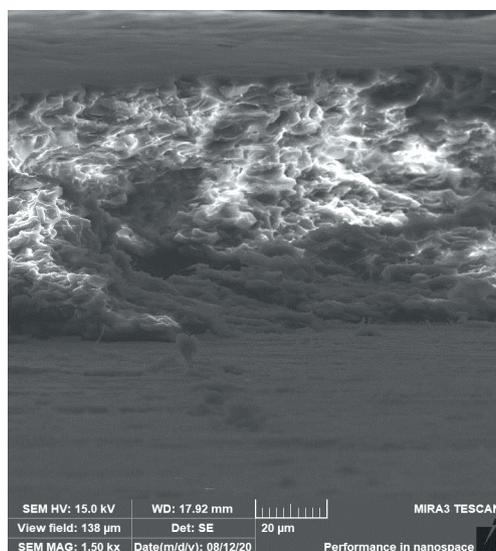


Рис. 2. Электронная микроскопия образца опытной группы
Fig. 2. Electron microscopy of a sample from the experimental group

Сравнительные характеристики кровяных сгустков в контрольной и опытной группах приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительные характеристики кровяных сгустков в контрольной и опытной группах
Table 1. Comparative characteristics of blood clots in the control and experimental groups

Параметр	Группа	
	контрольная	опытная
Толщина кровяного сгустка, нм	15	40
Плотность прилегания к титановой пластине	Кровяные сгустки отстояли от титановых пластин в среднем на 3 нм	Кровяные сгустки плотно прилегали к титановым пластинам
Тромбоциты, количество клеток в единице объема	$4,9 \cdot 10^9/\text{л}$	$6,0 \cdot 10^9/\text{л}$
Эритроциты, количество клеток в единице объема	$3,4 \cdot 10^{12}/\text{л}$	$4,7 \cdot 10^{12}/\text{л}$

Из приведенных на рис. 1, 2 и в табл. 1 данных видно, что толщина кровяных сгустков в контрольной группе составила в среднем 15 нм. При этом все кровяные сгустки отстояли от титановой пластины в среднем на 3 нм. В опытной группе кровяные сгустки плотно прилегали к титановым пластинам, а их толщина находилась в пределах 40 нм, что в 2,7 раза больше по сравнению с контрольной группой. Количество тромбоцитов в контрольной группе составило $4,9 \cdot 10^9/\text{л}$, а в опытной – $6,0 \cdot 10^9/\text{л}$, что в 1,22 раза больше контрольных значений. В опытной группе число эритроцитов составило $4,7 \cdot 10^{12}/\text{л}$, что в 1,4 раза больше, чем их количество ($3,4 \cdot 10^{12}/\text{л}$) в контрольной группе. При этом фибриновые нити в образцах контрольной группы не имели четкой направленности, а в опытной они были преимущественно ориентированы к поверхности титановых пластин.

Заключение

Выполненный эксперимент показал, что воздействие электрическим током 15–20 мкА на кровяной сгусток через титановые пластины, имитирующие дентальные имплантаты, способствует утолщению и уплотнению кровяных сгустков на поверхности электродов. Статистически достоверно в кровяном сгустке увеличивается число эритроцитов и тромбоцитов, что окажет положительный эффект на процесс остеоинтеграции. Целесообразно проведение дополнительных исследований *in vivo*.

Список литературы

1. Бочаров, М. Е. Электрическая составляющая кровообращения / М. Е. Бочаров // Концепт. 2015. Т. 13. С. 2511–2515.
2. Влияние низкочастотной электростимуляции на регенерацию костной ткани / Е. Е. Волков [и др.] // Патологическая физиология и экспериментальная терапия. 2015. Т. 59, № 3. С. 94–99.
3. Vanegas-Acosta, J. C. Numerical Simulation of Electrically Stimulated Osteogenesis in Dental Implants / J. C. Vanegas-Acosta, D. A. Garzón-Alvarado, V. Lancellotti // Bioelectrochemistry. 2014. Vol. 96. P. 21–36. DOI: 10.1016/j.bioelechem.2013.12.001.
4. Овчинников, Е. Н. Стимуляция остеогенеза постоянным электрическим током (обзор литературы) / Е. Н. Овчинников, М. В. Стогов // Травматология и ортопедия России. 2019. Т. 25, № 3. С. 185–191.
5. Electrically-Induced Osteogenesis in External Fixation Treatment / A. Ceballos [et al.] // Acta Orthop Belg. 1991. Vol. 57, No 2. P. 102–108.
6. Electrical Stimulation of the Growth Plate: A Potential Approach to an Epiphysiodesis / G. R. Dodge [et al.] // Bioelectromagnetics. 2007. Vol. 28, No 6. P. 463–470. DOI: 10.1002/bem.20329.
7. Kuzyk, P. R. The Science of Electrical Stimulation Therapy for Fracture Healing / P. R. Kuzyk, E. H. Schemitsch // Indian Journal Orthopaedics. 2009. Vol. 43, No 2. P. 127–131. DOI: 10.4103/0019-5413.50846.

References

1. Bocharov M. E. (2015) Electrical Component of Blood Circulation. *Concept*. 13, 2511–2515 (in Russian).
2. Volkov E. E., Reshetniak V. K., Domaratskaia E. I., Volkov A. E., Kucheranu V. G., Butorina N. N., et al. (2015) The Effect of Low Frequency Electrical Stimulation on Bone Tissue Regeneration. *Pathological Physiology and Experimental Therapy*. 59 (3), 94–99 (in Russian).
3. Vanegas-Acosta J. C., Garzón-Alvarado D. A., Lancellotti V. (2014) Numerical Simulation of Electrically Stimulated Osteogenesis in Dental Implants. *Bioelectrochemistry*. 96, 21–36. DOI: 10.1016/j.bioelechem.2013.12.001.
4. Ovchinnikov E. N., Stogov M. V. (2019) Stimulation of Osteogenesis by Direct Electric Current (Review). *Traumatology and Orthopedics of Russia*. 25 (3), 185–191 (in Russian).
5. Ceballos A., Pereda O., Ortega R., Balmaseda R. (1991) Electrically-Induced Osteogenesis in External Fixation Treatment. *Acta Orthop Belg*. 57 (2), 102–108.
6. Dodge G. R., Bowen J. R., Oh C. W., Tokmakova K., Simon B. J., Aroojis A., et al. (2007) Electrical Stimulation of the Growth Plate: A Potential Approach to an Epiphysiodesis. *Bioelectromagnetics*. 28 (6), 463–470. DOI: 10.1002/bem.20329.
7. Kuzyk P. R., Schemitsch E. H. (2009) The Science of Electrical Stimulation Therapy for Fracture Healing. *Indian Journal Orthopaedics*. 43 (2), 127–131. DOI: 10.4103/0019-5413.50846.

Вклад авторов

Остапович А. А. провел литературный обзор, патентный поиск, предложил идею возможности применения электрического тока для усиления соединения кость–дентальный имплантат, выполнил эксперимент, написал текст статьи.

Ивашенко С. В. провел эксперимент, проанализировал данные, полученные в результате эксперимента.

Шпак И. И. спроектировал и собрал аппарат для воздействия электрическим током, выбрал режимы работы аппарата, провел эксперимент.

Authors' contribution

Ostapovich A. A. conducted a literature review, patent search, proposed the idea of using electric current to strengthen the bone-dental implant connection, performed the experiment, wrote the text of the article.

Ivashenko S. V. conducted the experiment, analyzed the data obtained as a result of the experiment.

Shpak I. I. designed and assembled the device for exposure to electric current, selected the operating modes of the device, conducted the experiment.

Сведения об авторах

Остапович А. А., канд. мед. наук, доц. каф. ортопедической стоматологии и ортодонтии, Белорусский государственный медицинский университет (БГМУ)

Ивашенко С. В., д-р мед. наук, проф. каф. ортопедической стоматологии и ортодонтии, БГМУ

Шпак И. И., канд. техн. наук, доц. каф. информационных систем и технологий, Институт информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

223036, Республика Беларусь,
Минский р-н, г. Заславль, ул. Вишневая, 44
Тел.: +375 29 154-76-18
E-mail: ostapovich1984@list.ru
Остапович Алексей Андреевич

Information about the authors

Ostapovich A. A., Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Orthopedic Dentistry and Orthodontics, Belarusian State Medical University (BSMU)

Ivashenko S. V., Dr. of Sci. (Med.), Professor at the Department of Orthopedic Dentistry and Orthodontics, BSMU

Shpak I. I., Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Information Systems and Technologies, Institute of Information Technologies of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

223036, Republic of Belarus,
Minsk Region, Zaslavl, Vishnevaya St., 44
Tel.: +375 29 154-76-18
E-mail: ostapovich1984@list.ru
Ostapovich Alexey Andreevich