

РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОЙ ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ТКАНЕЙ ПАРОДОНТА В ПОСТОПЕРАЦИОННОМ ПЕРИОДЕ

С. М. Геращенко¹, А. В. Демидов², Л. А. Зюлькина³

^{1, 2, 3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹sgerash@mail.ru, ²demidandrey@gmail.com, ³larisastom@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью работы является разработка метода оценки состояния тканей пародонта и аппаратно-программного комплекса, реализующего данный метод. *Материалы и методы.* Обоснована возможность применения электрохимических методов оценки состояния тканей пародонта. Рассмотрена структура аппаратно-программного комплекса, основанная на джоульметрической оценке электрохимических параметров биообъекта. Подробно проанализированы преимущества и недостатки электрохимических двухэлектродных датчиков. Проведен анализ материалов для изоляции электродов. Описан алгоритм обработки полученных данных. Проведено экспериментальное исследование состояния тканей пародонта с помощью разработанной системы. В экспериментальном исследовании приняли участие 60 человек в возрасте от 19 до 45 лет. В исследуемую группу вошли люди с воспалительными заболеваниями тканей пародонта ($n = 30$), контрольную составили люди со здоровой полостью рта ($n = 30$). *Результаты.* В ходе проведенных экспериментальных исследований электрохимических свойств тканей пародонта методом джоульметрии с помощью разработанного аппаратно-программного комплекса было выявлено, что у пациентов со здоровой полостью рта значения работы тока находятся в пределах от 0,046 до 0,137 мкДж и в среднем составляют 0,088 мкДж. Значения работы тока у пациентов с выраженными клиническими проявлениями пародонтита находятся в пределах от 0,157 до 0,351 мкДж и в среднем составляют 0,248 мкДж. *Выводы.* Таким образом, была получена взаимосвязь между электрохимическим параметром работы тока и активностью воспаления в тканях пародонта, которая характеризуется тем, что при активном воспалительном процессе значения данного параметра более высокие по сравнению с состоянием объекта в норме.

Ключевые слова: джоульметрические информационно-измерительные системы, диагностика, фазы воспалительного процесса, джоульметрические параметры, электрохимические и морфологические изменения, работа тока

Для цитирования: Геращенко С. М., Демидов А. В., Зюлькина Л. А. Разработка аппаратно-программного комплекса для неинвазивной экспресс-диагностики состояния тканей пародонта в постоперационном периоде // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 1. С. 178–188. doi:10.21685/2227-8486-2023-1-12

DEVELOPMENT OF THE HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR NON-INVASIVE EXPRESS DIAGNOSTICS OF THE STATES OF PERIODONTAL TISSUES IN THE POST-OPERATIVE PERIOD

S.M. Gerashchenko¹, A.V. Demidov², L.A. Zyulkina³

^{1, 2, 3} Penza State University, Penza, Russia

¹ sgerash@mail.ru, ² demidandrey@gmail.com, ³ larisastom@yandex.ru

Abstract. *Background.* The aim of the work is to develop a method for assessing the state of periodontal tissues and a hardware-software complex that implements this method. *Materials and methods.* The possibility of using electrochemical methods for assessing the state of periodontal tissues is substantiated. The structure of the hardware-software complex based on the joulemetric assessment of the electrochemical parameters of a biological object is considered. The advantages and disadvantages of electrochemical two-electrode sensors are analyzed in detail. The analysis of materials for electrode insulation was carried out. An algorithm for processing the received data is described. An experimental study of the state of periodontal tissues was carried out using the developed system. The pilot study involved 60 people aged 19 to 45 years. The study group included people with inflammatory diseases of periodontal tissues ($n = 30$), the control group consisted of people with a healthy oral cavity ($n = 30$). *Results.* In the course of the experimental studies of the electrochemical properties of periodontal tissues by joulemetry using the developed hardware and software complex, it was found that in patients with a healthy oral cavity, the current work values range from 0.046 to 0.137 μJ and average 0.088 μJ . The current work values in patients with severe clinical manifestations of periodontitis range from 0.157 to 0.351 μJ and average 0.248 μJ . *Conclusions.* Thus, the relationship between the electrochemical parameter of the current work and the activity of inflammation in periodontal tissues was obtained, which is characterized by the fact that with an active inflammatory process, the values of this parameter are higher compared to the state of the object in the norm.

Keywords: joulemetric information-measuring systems, diagnostics, phases of the inflammatory process, joulemetric parameters, electrochemical and morphological changes, work of a current

For citation: Gerashchenko S.M., Demidov A.V., Zyulkina L.A. Development of the hardware and software complex for non-invasive express diagnostics of the states of periodontal tissues in the post-operative period. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(1):178–188. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2023-1-12

Введение

Ранняя диагностика воспалительных заболеваний тканей является актуальной проблемой в современной медицине и в частности стоматологии. Рост количества заболеваний пародонта связывают не только с наличием у пациентов красного пародонтопатогенного комплекса микроорганизмов, но и с ухудшением общесоматического здоровья популяции, связанного с ухудшением экологических показателей и ведением нездорового образа жизни, что в свою очередь приводит к ранней потере зубов [1].

В качестве клинических критериев степени тяжести пародонтита используют такие характеристики, как разрушение зубодесневого прикрепления

и степень резорбции альвеолярной кости [2]. Данные параметры не учитывают активность воспаления в тканях пародонта в момент обследования, хотя они тесно связаны с локальными патологическими процессами и изменениями, протекающими в тканях пародонта, в том числе изменение микроциркуляции. Большинство современных методов диагностики довольно сложно использовать в динамике в связи с возникновением трудностей при интерпретации результатов либо при невозможности многократного использования через короткие промежутки времени. Таким образом, ввиду широкого распространения патологий пародонтальных тканей, а также из-за отсутствия неинвазивных экспресс-методов диагностики, требуется разработка нового диагностического комплекса, лишенного данных недостатков.

Для первичной инструментальной диагностики и последующего контроля за пациентом в постоперационный период на сегодняшний день применяются методы, использующие рентгеновское излучение [3–5]. Рентгенодиагностика является золотым стандартом ввиду высокой диагностической ценности получаемой информации, однако лучевая нагрузка на пациента сильно ограничивает частоту применения данной группы методов диагностики.

Одним из направлений диагностики воспалительных заболеваний полости рта является изучение и анализ электрохимических процессов, протекающих в тканях пародонта в норме и при патологии в виде воспаления или дистрофических изменений [6, 7]. Главными достоинствами указанных методов являются неинвазивность, экспрессность, простота применяемой аппаратуры, а также безопасность для здоровья человека [8].

Исходя из вышеизложенного, для оценки состояния биологических объектов, а именно тканей пародонта, предлагается разработанный авторами аппаратно-программный комплекс для регистрации джоульметрических данных, обладающий высокой чувствительностью и информативностью.

Материалы и методы

В качестве метода получения информации об электрохимических характеристиках биологических тканей был выбран джоульметрический метод. Данные, получаемые в ходе джоульметрического исследования, представляют собой изменение межэлектродного напряжения во время воздействия на биообъект импульса тока заданной силы и длительности.

Разработанный аппаратно-программного комплекса для экспресс-диагностики состояния тканей пародонта в постоперационном периоде включает в себя три компонента: специализированный электрохимический датчик, измерительную систему с микроконтроллером и электронно-вычислительное устройство (персональный компьютер) для обработки и анализа полученных данных.

Обобщенная структурная схема аппаратно-программного комплекса приведена на рис. 1.

Наиболее важной частью аппаратно-программного комплекса является специализированный электрохимический датчик, так как от его типа, конструкции и используемых материалов зависит точность измеряемых параметров. Немаловажным является то, что электроды и корпус датчика непосредственно

контактируют с исследуемым биообъектом. Таким образом, необходимо сформулировать требования, предъявляемые к датчику диагностического комплекса:

1. Конструкция датчика должна обеспечивать плотное прилегание электродов к тканям пародонта.
2. Материал электродов должен быть химически инертным проводником.
3. Материал электродов и корпуса должны иметь возможность химической или термической стерилизации.
4. Материал корпуса должен быть мягким и не вызывать дискомфорт во время исследования.

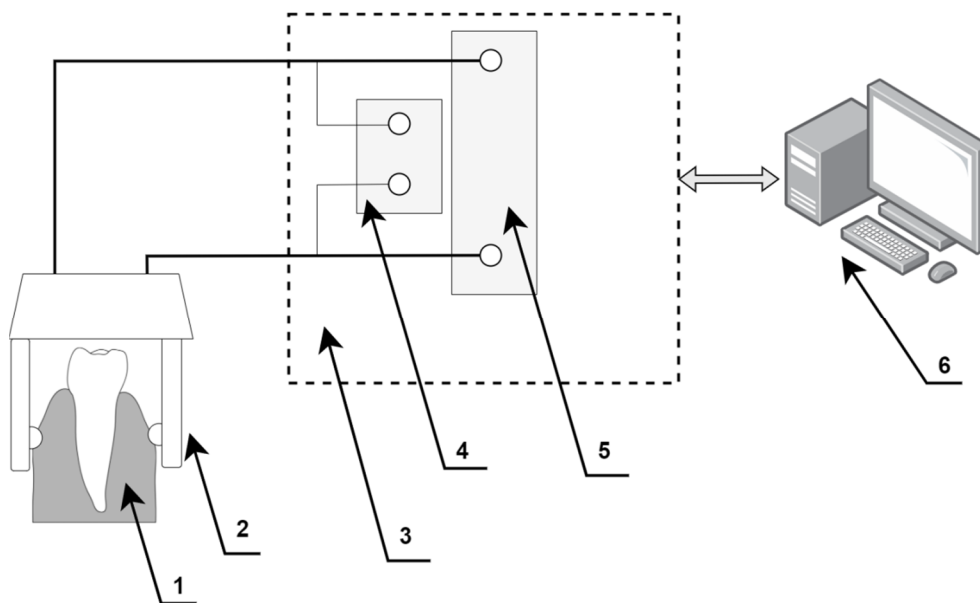


Рис. 1. Обобщенная структурная схема аппаратно-программного комплекса:
 1 – исследуемый объект; 2 – электрохимический двухэлектродный датчик;
 3 – измерительная система; 4 – блок измерения напряжения;
 5 – блок генерации импульса тока; 6 – персональный компьютер

Наибольшую воспроизводимость дают четырехэлектродные системы [9], но ввиду малой площади десны не представляется возможным их использование. Оптимальными являются двухэлектродные системы. При этом один электрод должен размещаться с оральной стороны, другой с щечной. Сама конструкция датчика представляет собой зажим. Это обеспечивает более плотное прилегание электродов к тканям пародонта.

Диаметр электродов равен 5 мм, что соответствует усредненной сумме медиально-дистальных диаметров ширины коронки зуба. Небольшой размер пластины электрода также обеспечивает плотное прилегание к десне, чтобы исключить влияние поверхностных процессов.

Эскиз разработанной конструкции датчика представлен на рис. 2.

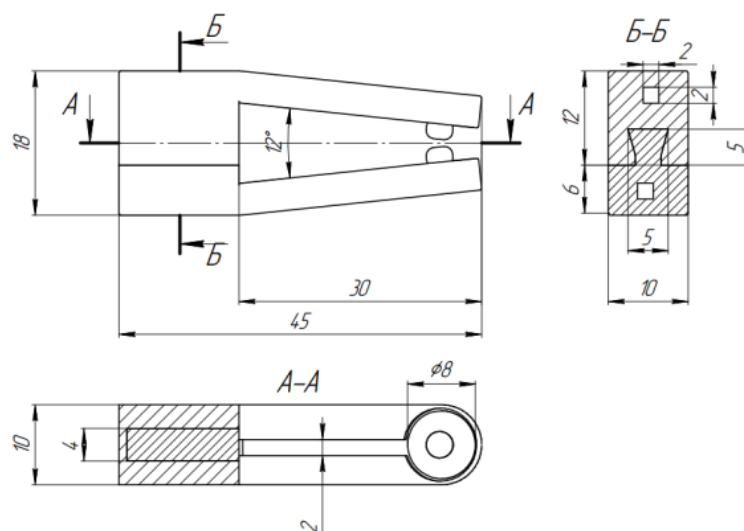


Рис. 2. Эскиз конструкции датчика

Далее рассмотрим требования к материалу электродов и корпуса датчика.

Наиболее подходящими материалами для электродов с точки зрения электрохимии являются ртуть и золото [10]. Однако использование ртути является весьма опасным ввиду ее высокой токсичности. Серебро является хорошей альтернативой и удовлетворяет поставленным требованиям, так как это инертный материал, способный выдержать как воздействие агрессивной среды ротовой полости, так и воздействие дезинфектантов [11]. Благодаря своей стабильности и малому электрическому потенциалу он позволяет свести к минимуму химические явления, которые могут вызвать артефакты сигнала, представляющие флуктуации напряжения (шумы) при отсутствии физиологических сигналов [12].

Исходя из сформулированных требований, в качестве материала корпуса датчика была выбрана пластизол на основе поливинилхлорида. В обычных условиях пластизол стабилен и представляет собой жидкую или пастообразную массу, а при нагревании пластизол быстро превращается в монолитный пластикат с высоким электрическим сопротивлением и химической стойкостью. Пластизол используется в медицине для изготовления деталей медицинских инструментов, мешков для крови, спринцовок [13]. Чистый поливинилхлорид менее предпочтителен, так как при воздействии некоторых веществ меняет свои первоначальные свойства и теряет эластичность.

Рассмотрим измерительную систему разработанного аппаратно-программного комплекса. В качестве измерительной системы был выбран потенциостат IPC Micro. Данное устройство имеет выходное напряжение ± 5 В и диапазон регулируемых потенциалов ± 5 В с максимальной скоростью регистрации 10 мс/триаду. Диапазоны выходного тока составляют от 1 нА до 10 мА. Питание осуществляется от блока питания со стабилизированным напряжением 12 В [14].

Связь измерительной системы с персональным компьютером происходит через UART-интерфейс.

На персональном компьютере с помощью специализированной программы, входящей в состав измерительной системы IPC Micro, задаются параметры подаваемого импульса (рис. 3) и регистрируется отклик биологического объекта.

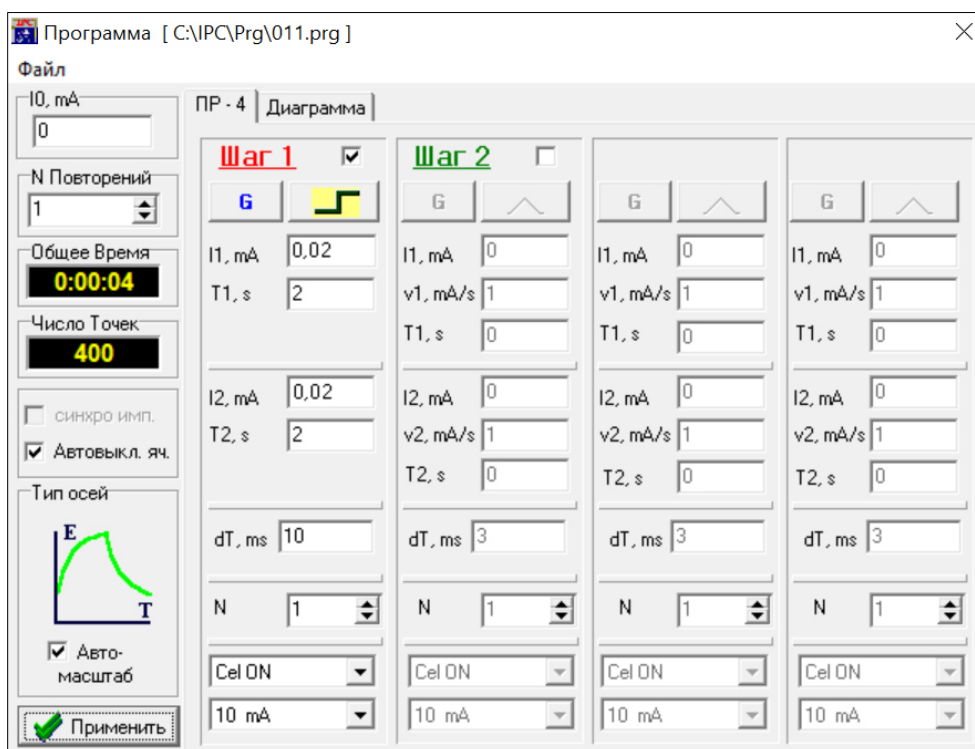
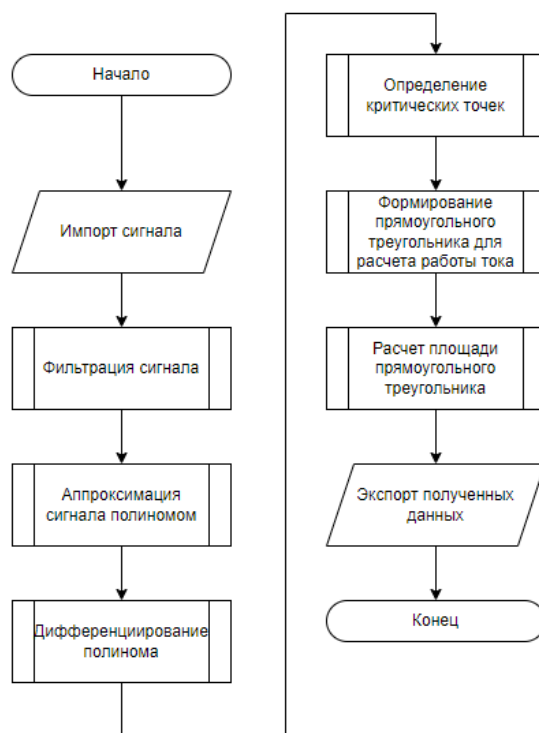


Рис. 3. Интерфейс программы для управления измерительной системой

Так как электровозбудимость пульпы интактных зубов находится в диапазоне от 0,02 до 0,06 мА [15], то амплитуда подаваемого для исследования импульса тока была выбрана на уровне 0,02 мА. Таким образом, проведение исследования при указанных параметрах не вызвало неприятных ощущений у пациентов. Длительность импульса составила 4 с, так как за указанное время протекает весь комплекс электрохимических реакций, при этом пациент может без затруднений сохранять неподвижное положение.

Реакция биообъекта на воздействие выражается в изменении межэлектродного напряжения (рис. 4). Данная кривая характеризует физиологическое состояние тканей и может быть разделена на несколько участков: заряд двойного электрического слоя (область S1 на графике), общее сопротивление электрохимической реакции (область S2 на графике) и активность электрохимической реакции (область S3 на графике). Итоговой характеристикой, которую можно интерпретировать с клинической точки зрения, является произведение площади прямоугольного треугольника ABC (характеризует активность электрохимической реакции) и силы импульса тока. Данная характеристика является работой тока, затрачиваемой на массоперенос ионов в возникающем электрическом поле.

Для анализа полученных с помощью разработанного комплекса данных и расчета работы тока авторами был разработан алгоритм. Целью обработки джоульметрического сигнала является выделение участка, характеризующего активность электрохимической реакции. Для этого исходный сигнал обрабатывается медианным фильтром для сглаживания возникающих высокочастотных помех. Затем сигнал аппроксимируется полиномом и дифференцируется. На данном этапе определяются критические точки функции, в которых закончилось экспоненциальное увеличение значений напряжения (характеризует процесс заряда двойного электрического слоя) и начались линейные изменения. По найденным критическим точкам строится прямоугольный треугольник. Схема алгоритма представлена на рис. 5.



184

Площадь полученного треугольника характеризует активность электрохимических реакций исследуемого биообъекта. Данную характеристику затем можно интерпретировать с клинической точки зрения. На основе вышеописанного алгоритма авторами была разработана программа в среде Matlab для обработки получаемых данных и расчета работы тока.

В ходе проведенных экспериментальных исследований электрохимических свойств тканей пародонта методом джоульметрии было исследовано 60 пациентов. Пациенты были разделены на две группы в зависимости от стоматологического статуса: 1-я – контрольная группа пациентов со здоровым состоянием полости рта; 2-я – исследуемая группа пациентов с клиническими проявлениями пародонтита.

В контрольную группу вошли 30 пациентов в возрасте от 19 до 45 лет с удовлетворительным гигиеническим состоянием полости рта. В исследуемую группу включены 30 пациентов в возрасте от 19 до 45 лет с диагнозом пародонтит средней степени тяжести.

Результаты

Был разработан аппаратно-программный комплекс для неинвазивной экспресс-диагностики и с его помощью проведено исследование состояния тканей пародонта у различных пациентов.

График распределения значений работы тока исследуемой и контрольной групп представлены на рис. 6.

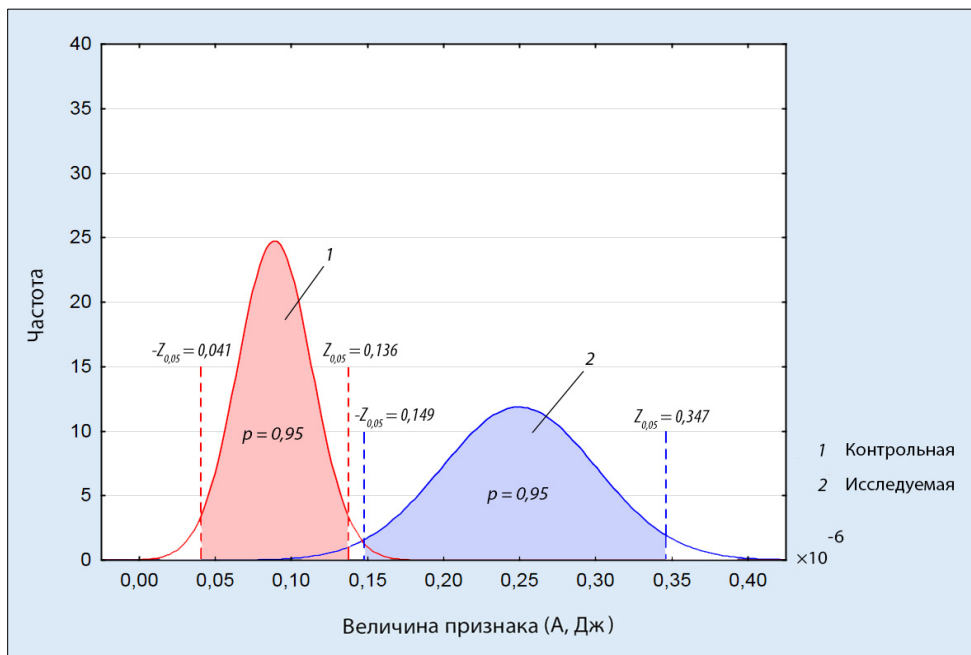


Рис. 6. График распределения значений работы тока

По результатам проведенного экспериментального исследования было выявлено, что значение параметра работы тока в тканях пародонта, находящихся в состоянии «норма», находятся в пределах от 0,046 до 0,137 мкДж

и в среднем составляют 0,088 мкДж. Значения параметра работы тока в тканях при наличии воспалительного процесса, вследствие активации биологических процессов, находятся в пределах от 0,157 до 0,351 мкДж и в среднем составляют 0,248 мкДж, что значительно превышает среднее значение этого показателя в норме.

Выводы

По результатам проведенного исследования была выявлена взаимосвязь между электрохимическим параметром работы тока и активностью воспаления в тканях пародонта, которая характеризуется тем, что при активном воспалительном процессе значения данного параметра более высокие по сравнению с состоянием объекта в норме. Полученные с помощью разработанного аппаратно-программного комплекса данные позволяют сделать вывод о возможности создания системы экспресс-распознавания состояния тканей пародонта. Разработанная конструкция двухэлектродного датчика позволяет получать воспроизводимые результаты за счет минимизации влияния процессов, происходящих на границе «электрод – исследуемая среда», на результаты исследования.

Список литературы

1. Маланьин И. В. Современные методы лечения и профилактики заболеваний пародонта : учеб.-метод. пособие. Краснодар : Кубанская научная школа стоматологии, 2012. 144 с.
2. Янушевич О. О., Дмитриева Л. А. Пародонтология: национальное руководство. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2018. 752 с.
3. Бурхонова Н. Д. К вопросу заболевания пародонта // Мировая наука. 2019. Т. 4, № 25. С. 217–220.
4. Вольф Г. Ф., Хэссэл Т. М. Пародонтология. Гигиенические аспекты. М. : МЕД-пресс-информ, 2014. 360 с.
5. Иванов П. В., Зюлькина Л. А., Удальцова Е. В. [и др.]. Современные методы диагностики воспалительных заболеваний пародонта (литературный обзор) // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2020. № 6. С. 194–200.
6. Иванов П. В., Зюлькина Л. А., Капралова Г. А. [и др.]. Исследование взаимосвязи джоульметрических параметров с воспалительными изменениями тканей пародонта // Биология и медицина. 2016. № 2. С. 1–4.
7. Almeida M. O., Maltarollo V. G., Shim H. [et al.]. Medicinal electrochemistry: Integration of electrochemistry, medicinal chemistry and computational chemistry // Current Medicinal Chemistry. 2014. № 20. P. 2266–2275.
8. Demidov A. V., Konovalova E. V., Zyulkin L. A., Gerashchenko S. M. Development of the Sensor for Joule Metric Assessment of Bone Regenerate Formation // Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). 2022. P. 52–54.
9. Newman J., Balsara N. P. Electrochemical systems. John Wiley & Sons, 2021. 567 с.
10. Несмеянов Н. П., Дузенко К. К., Литвинов А. Ю. [и др.]. Обзор электродов, применяемых в электрохимии // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. 2019. С. 261–265.
11. Abdulbari H. A., Basheer E. A. M. Electrochemical biosensors: electrode development, materials, design, and fabrication // ChemBioEng Reviews. 2017. № 2. P. 92–105.

12. Белова В. С. Электрохимическая модификация поверхности серебряных электродов для медицинской электромиографической диагностики : дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2022. 131 с.
13. Лось Д. М., Шаповалов В. М., Зотов С. В. Применение полимерных материалов для изделий медицинского назначения // Проблемы здоровья и экологии. 2020. № 2. С. 5–13.
14. Потенциостат IPC Micro. URL: <http://volta.spb.ru/catalog/potentsiostat/potentsiostat-serii-ipc/72-potentsiostat-ipc-micro> (дата обращения: 12.05.2023).
15. Николаева А. И., Петрова Е. В. Электроодонтодиагностика : учеб. пособие. М. : МЕДпресс-информ, 2014. 40 с.

References

1. Malan'in I.V. *Sovremennye metody lecheniya i profilaktiki zabolevaniy parodonta: ucheb.-metod. posobie* = Modern methods of treatment and prevention of periodontal diseases : educational and methodical manual. Krasnodar: Kubanskaya nauchnaya shkola stomatologii, 2012:144. (In Russ.)
2. Yanushevich O.O., Dmitrieva L.A. *Parodontologiya: natsional'noe rukovodstvo* = Periodontology: national leadership. Moscow: GEOTAR-Media, 2018:752. (In Russ.)
3. Burkhonova N.D. On the issue of periodontal disease. *Mirovaya nauka = World Science*. 2019;4(25):217–220. (In Russ.)
4. Volf G.F., Khessel T.M. *Parodontologiya. Gigienicheskie aspekty* = Periodontology. Hygienic aspects. Moscow: MEDpress-inform, 2014:360. (In Russ.)
5. Ivanov P.V., Zyul'kina L.A., Udal'tsova E.V. et al. Modern methods of diagnosis of inflammatory periodontal diseases (literary review). *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* = Modern science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and Technical Sciences. 2020;(6):194–200. (In Russ.)
6. Ivanov P.V., Zyul'kina L.A., Kapralova G.A. et al. Investigation of the relationship of joulemetric parameters with inflammatory changes in periodontal tissues. *Biologiya i meditsina = Biology and Medicine*. 2016;(2):1–4. (In Russ.)
7. Almeida M.O., Maltarollo V.G., Shim H. et al. Medicinal electrochemistry: Integration of electrochemistry, medicinal chemistry and computational chemistry. *Current Medicinal Chemistry*. 2014;(20):2266–2275.
8. Demidov A.V., Konovalova E.V., Zyul'kina L.A., Gerashchenko S.M. Development of the Sensor for Joule Metric Assessment of Bone Regenerate Formation. *Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. 2022:52–54.
9. Newman J., Balsara N.P. *Electrochemical systems*. John Wiley & Sons, 2021:567.
10. Nesmeyanov N.P., Duzenko K.K., Litvinov A.Yu. et al. Review of electrodes used in electrochemistry. *Energoberegayushchie tekhnologicheskie komplekсы i oborudovanie dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov* = Energy-saving technological complexes and equipment for the production of building materials. 2019:261–265. (In Russ.)
11. Abdulbari H.A., Basheer E.A.M. Electrochemical biosensors: electrode development, materials, design, and fabrication. *ChemBioEng Reviews*. 2017;(2):92–105.
12. Belova V.S. Electrochemical modification of the surface of silver electrodes for medical electromyographic diagnostics. PhD dissertation. Ivanovo, 2022:131. (In Russ.)
13. Los' D.M., Shapovalov V.M., Zotov S.V. Application of polymer materials for medical devices. *Problemy zdorov'ya i ekologii* = Health and environmental issues. 2020;(2):5–13. (In Russ.)
14. *Potentsiostat IPC Micro*. (In Russ.). Available at: <http://volta.spb.ru/catalog/potentsiostat/potentsiostat-serii-ipc/72-potentsiostat-ipc-micro> (accessed 12.05.2023).
15. Nikolaeva A.I., Petrova E.V. *Elektroodontodiagnostika: ucheb. posobie* = Electro-dental diagnostics : textbook. Moscow: MEDpress-inform, 2014:40. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Михайлович Геращенко

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры медицинской
кибернетики и информатики
Медицинского института,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sgerash@mail.ru

Sergey M. Gerashchenko

Doctor of technical sciences,
associate professor,
professor of the sub-department
of medical cybernetics and informatics
of Medical Institute,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Андрей Владимирович Демидов

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: demidandrey@gmail.com

Andrey V. Demidov

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

Лариса Алексеевна Зюлькина

доктор медицинских наук, доцент,
профессор кафедры стоматологии
Медицинского института,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: larisastom@yandex.ru

Larisa A. Zyulkina

Doctor of medical sciences, associate
professor, professor of the sub-department
of dentistry of Medical Institute,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 20.12.2022

Поступила после рецензирования/Revised 09.02.2023

Принята к публикации/Accepted 10.03.2023