

НАНОСЕНСОРЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ЭКГ И ЭЭГ КАРТИРОВАНИЯ

Проблема большого числа больных сердечно-сосудистыми заболеваниями и заболеваниями головного мозга является актуальной во всем мире. Особо остро стоит проблема смертности и последствий от этих болезней. Поэтому важным направлением в медицинском приборостроении является совершенствование и повышение информативности методов диагностики этих заболеваний. В Томском политехническом университете разработаны наносенсоры, позволяющие существенно повысить качество электрофизиологических измерений. Предложено применить разработанные наносенсоры для ЭКГ и ЭЭГ картирования.

Ключевые слова: наносенсор, ЭЭГ, ЭКГ, картирование.

Введение. Патологии сердечно-сосудистой системы на сегодняшний день лидируют в печальной статистике смертности населения в мире. Это подтверждается данными Всемирной организации здравоохранения. Причем данная причина смерти продолжает лидировать в странах с высоким уровнем дохода, несмотря на снижение в процентном соотношении [1]. Особенно среди всех причин смерти выделяется ишемическая болезнь сердца (ИБС) и инсульт. Необходимо отметить, что по данным статистики 25–30 % больных с подтвержденным диагнозом ИБС умирает внезапно. Наибольшему риску внезапной сердечной смерти в первый час развития инфаркта при этом подвержены больные острым инфарктом миокарда [2]. Инсульт, так же как и ИБС, может привести к смерти. При инсульте симптоматика может сохраняться более 24 часов или приводит к смерти больного в короткий промежуток времени вследствие причины цереброваскулярного происхождения [3].

Методы и средства. Ранняя диагностика состояния сердечно-сосудистой системы и головного мозга является важнейшей составляющей системных мероприятий по повышению долголетия человека и снижению рисков утраты трудоспособности. В целом для диагностики вышеуказанных заболеваний применяются неинвазивные и инвазивные методы.

Для целей ранней диагностики в клинической и поликлинической практике наиболее удобно использовать неинвазивные методы диагностики. Данные методы позволяют получить информацию о состоянии пациента в сочетании с возможностью

динамического наблюдения и реализацией персонализированного подхода.

Выделяют следующие основные методы неинвазивной диагностики: электрографические — электрокардиография (ЭКГ), ЭКГ картирование, электроэнцефалография (ЭЭГ), электромиография, холтеровское мониторирование, магнитокардиография; механографические — апекскардиограмма, баллистокардиограмма, сейсмокардиограмма и визуализационные методы — рентгенографические, ультразвуковые, радионуклидные, рентгеновская компьютерная томография, магнитнорезонансная томография.

Наиболее распространенными методами инструментальных исследований сердца и мозга являются ЭКГ, ЭКГ картирование и ЭЭГ. Главной задачей методов ЭКГ и ЭЭГ является измерение и представление в удобном виде для восприятия электрических потенциалов с поверхности тела человека. Кроме того, в последнее время к основным задачам добавилась задача автоматической интерпретации полученных результатов с помощью специального программного обеспечения [4–6]. С помощью ЭЭГ и ЭКГ оцениваются временные (частотные), фазовые и амплитудные характеристики сигналов в определенный момент времени и в динамике. Кроме того, оценивается множество разработанных критериев, производных и интегральных характеристик сигналов с целью выявления отклонений от нормы. Вместе с тем в источниках приводятся разные данные о достоверном значении этих исследуемых показателей и критериев и негативном влиянии на них артефактов. Также

значение некоторых из них подвергается сомнению [7, 8].

В свою очередь, использование одноканальных, 3-, 6-, 12-канальных приборов не позволяет достоверно локализовать участок ишемического повреждения сердечной мышцы или мозга. Для решения этой проблемы были предложены многоканальные системы картирования, включающие в себя более 64 каналов. Примером является разработанная методика поверхностного картирования сердца со всей поверхности грудной клетки. Для реализации этой методики используются многоканальные системы, включающие до 300 датчиков для съема ЭКГ [9, 10]. Методика дает возможность в каждый момент сердечного цикла анализировать электрические потенциалы сердца на поверхности грудной клетки. Визуализация с помощью разработанного программного обеспечения этих потенциалов, по сути, является моментной картиной электрического поля клеток миокарда. Таким образом, на представленной картине можно выделить локальные дефекты электрофизиологических свойств сердца и получить широкие возможности для решения задачи по диагностике ишемической болезни сердца, что подтверждается работами в данном направлении [11–18]. Данная методика требует наличия разработанной математической модели сердца и торса человека.

Различают решение обратной и прямой задач моделирования электрической активности сердца [19]. Обратная задача состоит в том, что по распределению электрического потенциала на поверхности торса восстанавливается распределение потенциалов на поверхности сердца (3D картирование) [20–29]. Обратная задача электрокардиографии, с математической точки зрения, является задачей гармонического продолжения потенциала в сторону источников, т.е. задачей Коши для уравнения Лапласа. Расчетной областью, в которой задается уравнение Лапласа, является часть грудной клетки, ограниченная внешней поверхностью сердца, поверхностью грудной клетки, на которой доступна регистрация ЭКГ, и воображаемыми поперечными сечениями грудной клетки на уровне диафрагмы и ключиц. На части поверхности грудной клетки, где доступна регистрация ЭКГ, задаются полученные в результате ЭКГ-картирования значения электрического потенциала, а также условие равенства нулю нормальной производной потенциала. Эти данные составляют граничные условия задачи Коши. Задача Коши для уравнения Лапласа является некорректно поставленной по Адамару: сколь угодно малые погрешности условия могут привести к произвольно большим погрешностям решения. Для решения задачи Коши для уравнения Лапласа необходимо применять специальные, т.н. регуляризирующие алгоритмы решения. Результатом решения задачи Коши является распределение потенциала на поверхности сердца, которое далее должно быть интерпретировано врачом-диагностом.

Прямая задача состоит в расчете системы уравнений распространения электрического возбуждения по сердечной ткани [30–33]. Для моделирования сердечной активности используется осреднение при переходе от дискретной среды к непрерывной. Наиболее известны монодоменная, бидоменная и многодоменная модели. Для бидоменной модели электрические свойства миокарда описываются системой параболических и эллиптических дифференциальных уравнений в частных производных.

В рамках данной модели сердечная ткань представлена в виде двух взаимопроникающих сплошных сред — внутриклеточной и внеклеточной. Внутриклеточные и внеклеточные среды взаимодействуют через клеточную мембрану. Процесс взаимодействия описывается системой нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, моделирующих перенос ионов через клеточную мембрану. Мгновенное распределение потенциалов на поверхности сердца переносится на поверхность тела с помощью уравнения Лапласа. Далее оно может быть сопоставлено с измеренным распределением потенциалов. Несовпадение этих распределений требует итерационной коррекции параметров бидоменной модели, в том числе и локализации неоднородностей свойств сердечной ткани. В настоящее время в рамках проекта Chaste (Cancer, Heart and Soft Tissue Environment) существует библиотека классов, позволяющая строить компьютерные модели электрической активности сердечной ткани. Также последние несколько десятилетий активно развиваются методы исследования головного мозга, которые разделились в целом на два направления — функциональное и структурное. ЭЭГ относится к категории функциональных исследований головного мозга. К методам ЭЭГ относятся картирование спектральной мощности ЭЭГ [34–36] и амплитудное картирование ЭЭГ [37, 38].

Обсуждение и выводы. Методы поверхностного картирования дают возможность оценить относительный вклад дипольной и мультипольных частей в поле электрических источников. Тем не менее рассматриваемые методы имеют недостатки в области неинвазивной локализации и оценке размеров патологических областей и ишемии в частности [39]. Это объясняется тем что, в соответствии со свойствами решения уравнения Лапласа высшие пространственные гармонические составляющие поля, создаваемого источником в проводящей среде, ослабевают по мере удаления от источника [40, 41]. Таким образом, слабые сигналы при использовании современного оборудования, представленного на рынке, сглаживаются и практически неразличимы на фоне помех.

В Томском политехническом университете с конца 80-х годов ведутся разработки сенсоров для применения в области электрофизиологических исследований. К настоящему моменту разработаны уникальные наносенсоры с высочайшими метрологическими характеристиками, позволяющими измерять сигналы нановольтового уровня. Кроме того, разработаны и используются в экспериментальной практике аппаратные и программные комплексы на основе разработанных наносенсоров [42]. Наносенсоры представляют собой высокостабильные, малощумящие, неполяризующиеся электроды. Применение данных электродов позволило исключить из измерительной цепи фильтрующие звенья в полосе частот от 0 до 10 кГц. Также разработан модуль преобразования томографического изображения сердца в трехмерную конечно-элементную геометрическую модель. Проводилось тестирование данного модуля на пациентах.

Используя имеющийся опыт и наработки [43–45] предлагается создать многоканальный аппаратно-программный комплекс (АПК) на наносенсорах для регистрации ЭКГ и ЭЭГ потенциалов нановольтового и микровольтового уровня с целью локализации поврежденных и некротических участков методом поверхностного картирования.

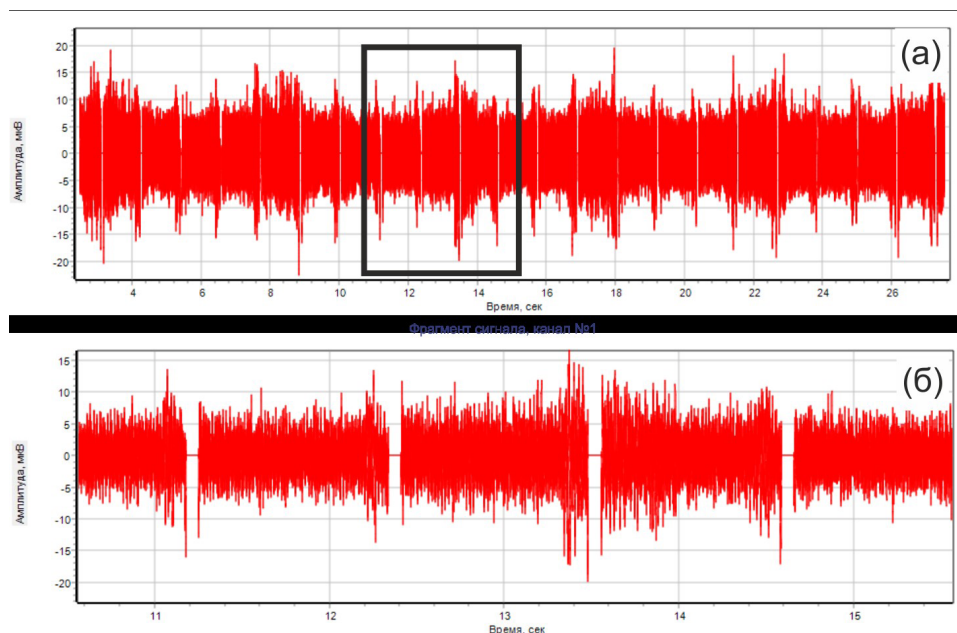


Рис. 1. Микропотенциалы сердца пациента, зарегистрированные до заболевания (27.07.21), 1 отв. по Холтеру

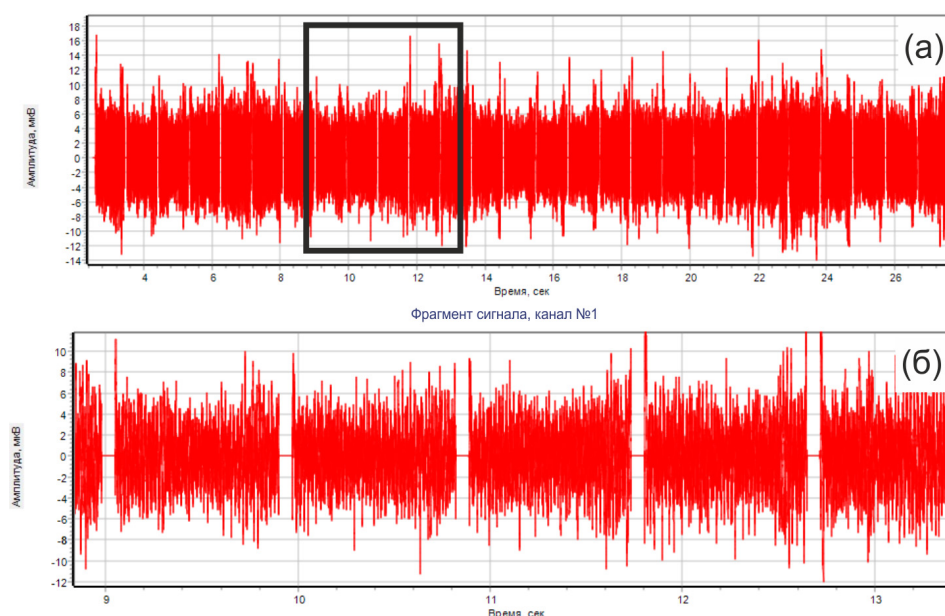


Рис. 2. Микропотенциалы сердца пациента, зарегистрированные после заболевания (24.09.21), 1 отв. по Холтеру. Амплитуда выросла

В предыдущих работах были проведены сравнительные испытания стандартных хлор-серебряных электродов FIAB Spa (Florence, Italy) для записи сигналов ЭКГ и разработанных наносенсоров с использованием 3-канального аппаратно-программного комплекса [46]. Предварительные исследования проводились на добровольцах в Томском НИИ кардиологии. Результаты сравнения стандартных хлор-серебряных электродов и наносенсоров показывают, что разработанные наносенсоры имеют более высокую чувствительность, а также обладают помехоустойчивостью к сетевой помехе. Кроме того, ЭКГ, регистрируемая вдали от источников помех с помощью наносенсоров, не содержит электромагнитных помех в диапазоне от 0 до 10000 Гц.

В последние годы были проведены исследования на добровольцах, в том числе перенесших заболевание COVID-19, вызванное коронавирусом SARS-

CoV-2. Пример результата исследования сердечной мышцы пациента, перенесшего данное заболевание средней тяжести, до заболевания и после представлены на рис. 1 и 2. Анализируя рис. 1 и 2, видно, что амплитуда микропотенциалов уменьшилась после перенесенного заболевания, что свидетельствует о начальной стадии ишемического поражения сердечной мышцы. Полученные результаты были проанализированы с использованием ранее разработанной методики [47, 48]. На рис. 3 представлен результат сравнения средних значений суммарных энергий по всем временным интервалам в следующих амплитудных интервалах: (0,5–1,0) мкВ; (1,1–3,0) мкВ; (3,1–5,0) мкВ; (5,1–20,0) мкВ; 20,1–50,0) мкВ в процентах. Результат первого исследования от 27.07.2021 принимается за 100 %. Как видно из гистограммы, произошло существенное изменение энергии микропотенциалов сердца на боль-

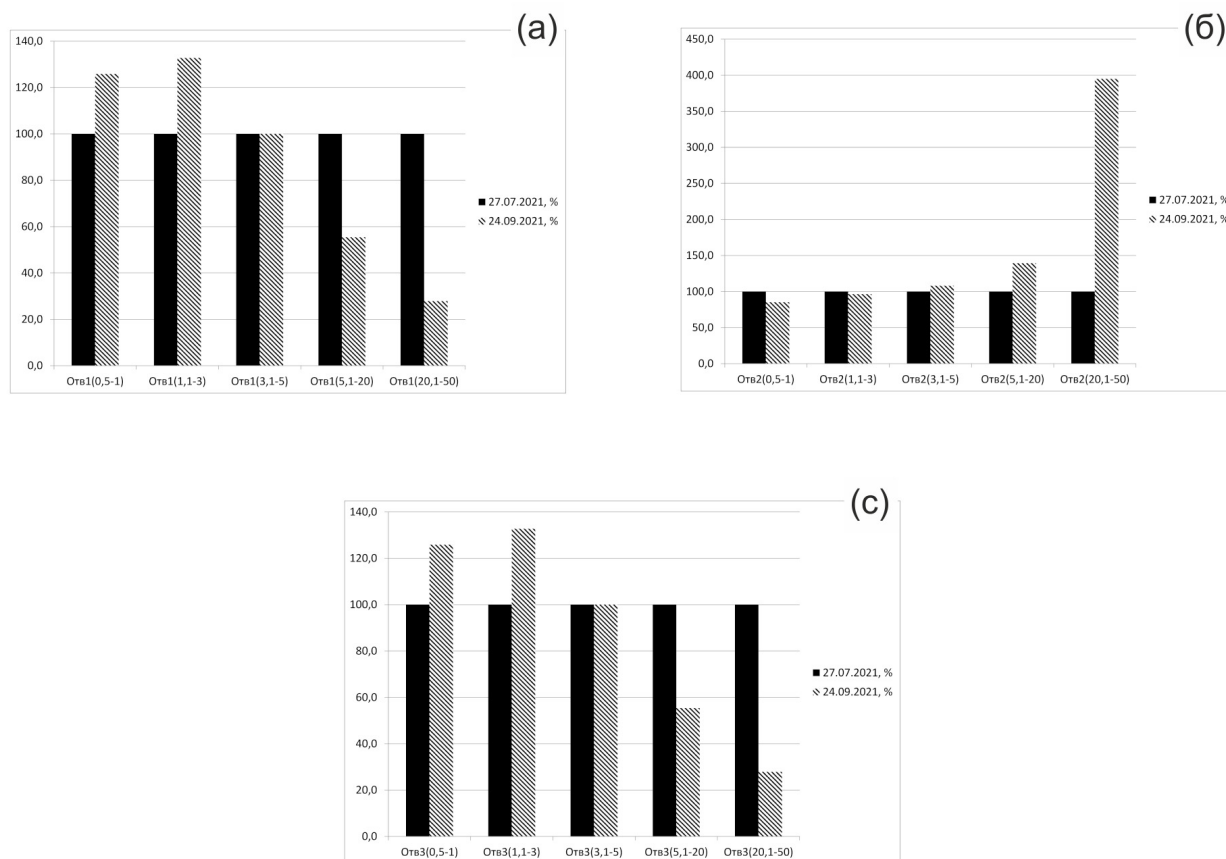


Рис. 3. (а) первое отведение; (б) второе отведение; (с) третье отведение. Сравнение средних значений суммарных энергий по всем временным интервалам в следующих амплитудных интервалах: (0,5–1,0) мкВ; (1,1–3,0) мкВ; (3,1–5,0) мкВ; (5,1–20,0) мкВ; 20,1–50,0 мкВ в процентах. Результат 1-го исследования от 27.07.2021 принимается за 100 %

шинстве интервалов во всех трех отведениях. Также были проанализированы изменения суммарной энергии микропотенциалов в каждом отведении по всем временным и амплитудным интервалам, результат представлен на рис. 4. Данный результат можно получить только с использованием наносенсоров, обеспечивающих высокое разрешение и чувствительность аппаратуры. К сожалению, большинство широко используемых во врачебной поликлинической практике кардиографических приборов и систем не могут измерить столь малые амплитудные изменения в сигнале. С разработкой отечественного аппаратно-программного комплекса такая возможность появилась. Теперь можно неинвазивно диагностировать ишемию на самых ранних стадиях развития и принимать необходимые меры заранее, не дожидаясь тяжелых последствий. Данная методика в том числе подходит и для съема сигналов ЭЭГ.

Использование наносенсоров в предлагаемом методе открывает новые возможности для локализации поврежденных и некротических участков в сердце на самых ранних стадиях развития болезни. Задача же картирования сердца человека на основе данных от стандартных датчиков ЭКГ технически решена, кроме того, решены прямая и обратная задачи моделирования сердечной активности. Вместе с тем, учитывая уникальные характеристики и информативные возможности разработанных в лаборатории «Медицинская инженерия» Томского политехнического университета наносенсоров, появилась возможностькратно увеличить достоверность и информативность метода картирования

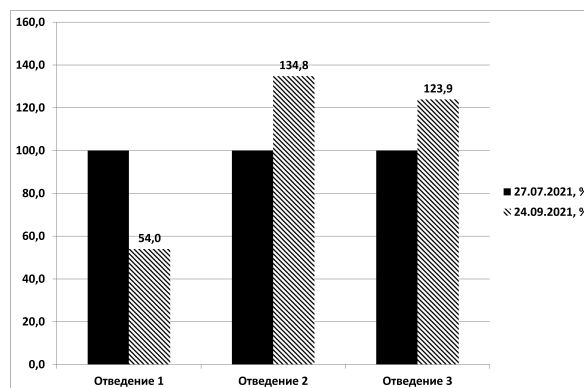


Рис. 4. Изменение суммарной энергии микропотенциалов в каждом отведении по всем временным и амплитудным интервалам. Результат 1-го исследования от 27.07.2021 принимается за 100 %

на основе измерения микропотенциалов сердца. Учитывая кратное увеличение потока информации при многоканальном использовании разработанных наносенсоров для картирования сердца потребуются заново оценить потенциал, доработать существующие модели или разработать новые модели сердечной активности.

Следует отметить, что предлагаемые пути улучшения качества ЭЭГ и ЭКГ картирования также исключают применение дорогостоящего МРТ оборудования, что снизит стоимость самого исследования как для пациента, так и для государства. Кроме того, снизится нагрузка на МРТ оборудование, что

даст возможность использовать его для других исследований пациентов.

Внедрение данной аппаратуры в медицинскую практику позволит исключить у большинства пациентов электрофизиологическое исследование сердца (ЭФИ) и эндокардиальное электрофизиологическое исследование сердца (эндоЭФИ). Следует отметить, что у части пациентов есть такие противопоказания к ЭФИ, как заболевания пищевода, острые инфекционные заболевания, фибрилляция предсердий, тромбы в полостях сердца, острые инфекционные заболевания, острый инфаркт миокарда, нестабильная стенокардия, хроническая сердечная недостаточность, аневризма левого желудочка с тромбом, сердечные механические протезы левых камер сердца при доступе слева.

Для дальнейшего развития представленного метода предлагается продолжить теоретические и практические исследования моделирования сердечной активности и многоканальной регистрации микропотенциалов наносенсорами в реальном времени с целью обнаружения и локализации поврежденных и некротических участков в сердечной мышце и головном мозге человека.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТПУ.

Благодарности. Авторы благодарят за помощь и консультирование Максимова Ивана Вадимовича, профессора, д.м.н. НИИ кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр (НИМЦ).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

1. The top 10 causes of death // World Health Organization. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (дата обращения: 10.09.2022).
2. Крюков Н. Н., Николаевский Е. Н., Поляков В. П. Ишемическая болезнь сердца (современные аспекты болезни, диагностики, лечения, профилактики, лечения, экспертизы): моногр. Самара, 2010. 651 с. ISBN 978-5-91082-10.
3. Кандыба Д. В. Инсульт // Российский семейный врач. 2016. Т. 20, № 3. С. 5–15. DOI: 10.17816/RFD201635-15.
4. Elgendi M. Fast QRS Detection with an Optimized Knowledge-Based Method: Evaluation on 11 Standard ECG Databases // PLoS One. 2013. Vol. 8 (9). e73557. DOI: 10.1371/journal.pone.0073557.
5. Martis R. J., Acharya U. R., Min L. C. ECG beat classification using PCA, LDA, ICA and Discrete Wavelet Transform // Biomedical Signal Processing and Control. 2013. Vol. 8 (5). P. 437–448. DOI: 10.1016/j.bspc.2013.01.005.
6. Rybalka S., Yuzhakov M., Ivanov M., Nguyen D. K., Kodermjatov R., Guo W., Maksimov I., Zimin Ilya. Methods and Approaches for Automatic Processing and Storage of High-Potential Electrocardiogram Registered by Hardware and Software Complex on Nanosensors // MATEC Web Conf. 2018. Vol. 155. P. 1008. DOI: 10.1051/mateconf/201815501008.
7. Lip Y. H. Risk of Arrhythmia and Sudden Death // Journal of the Royal Society of Medicine. 2002. Vol. 95. P. 108. DOI: 10.1177/014107680209500219.
8. Bear L. R., Cheng L. K., LeGrice I. J. [et al.]. Forward problem of electrocardiography // Circulation: Arrhythmia and Electrophysiology. 2015. Vol. 8. P. 677–684. DOI: 10.1161/CIRCEP.114.001573.
9. Lux R. L., Smith C. R., Wyatt R. F. [et al.]. Limited lead selection for estimation of body surface potential maps in electrocardiography // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 1978. Vol. 3. P. 270–276. DOI: 10.1109/TBME.1978.326332.
10. Gerstenfeld E. P., Sippens-Groenewegen A., Lux R. L. [et al.]. Derivation of an optimal lead set for measuring ectopic atrial activation from the pulmonary veins by using body surface mapping // Journal of Electrocardiology. 2000. Vol. 33 (1). P. 179–185. DOI: 10.1054/jelc.2000.20307.
11. Ferrer-Albero A., Godoy E. J., Lozano M. [et al.]. Non-invasive localization of atrial ectopic beats by using simulated body surface P-wave integral maps // PLoS One. 2017. Vol. 12 (7). e0181263. DOI: 10.1371/journal.pone.0181263.
12. Yoram R. Noninvasive Electrocardiographic Imaging of Arrhythmogenic Substrates in Humans // Circulation Research. 2013. Vol. 112 (7). P. 863–74. DOI: 10.1161/CIRCRESAHA.112.279315.
13. Ghosh S., Cooper D. H., Vijayakumar R. [et al.]. Early repolarization associated with sudden death: Insights from noninvasive electrocardiographic imaging // Heart Rhythm. 2010. Vol. 7 (4). P. 534. DOI: 10.1016/j.hrthm.2009.12.005.
14. Oster H. S., Taccardi B., Lux R. L. [et al.]. Electrocardiographic Imaging Electronic text // Circulation. 1998. Vol. 97. P. 1496–1507. DOI: 10.1161/01.CIR.97.15.1496.
15. Ramanathan C., Jia P., Ghanem R. [et al.]. Noninvasive Electrocardiographic Imaging (ECGI): Application of the Generalized Minimal Residual (GMRes) Method // Annals of Biomedical Engineering. 2003. Vol. 31. P. 981–994. DOI: 10.1114/1.1588655.
16. Ghanem R. N. Noninvasive electrocardiographic imaging of arrhythmogenesis: insights from modeling and human studies // Journal of Electrocardiology. 2007. Vol. 40. P. 169–173. DOI: 10.1016/j.jelectrocard.2007.06.014.
17. Rajagopal A., Radzicki V., Lee H. [et al.]. Nonlinear electrocardiographic imaging using polynomial approximation networks // APL Bioengineering. 2018. Vol. 2 (4). 46101. DOI: 10.1063/1.5038046.
18. Trobec R. Computer analysis of multichannel ECG // Computers in Biology and Medicine. 2003. Vol. 33. P. 215–226. DOI: 10.1016/S0010-4825(02)00088-4.
19. Артюхина Е. А., Яшков М. В., Ревивили А. Ш. Неинвазивное электрофизиологическое картирование сердца: от разработок к практике // ПКК. 2020. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neinvazivnoe-elektrofiziologicheskoe-kartirovanie-serdtsa-ot-razrabotok-k-praktike> (дата обращения: 28.02.2021).
20. Бокерия Л. А., Ревивили А. Ш., Калинин В. В., Ляджина О. С., Фетисова Е. А., Симонян Г. Ю. Неинвазивное эндокардиальное картирование желудочков сердца на основе решения обратной задачи электрокардиографии // Вестник аритмологии. 2009. № 57. С. 24–28.
21. Бокерия Л. А., Ревивили А. Ш., Калинин А. В. Программно-аппаратный комплекс для неинвазивного электрофизиологического исследования сердца на основе решения обратной задачи электрокардиографии // Медицинская техника. 2008. № 6. С. 1–7.
22. MacLeod R. S., Brooks D. H. Recent progress in inverse problem in electrocardiology // IEEE Eng. in Med. Bio. Mag. 1998. Vol. 17 (1). P. 78–83. DOI: 10.1109/51.646224.
23. Voth E. J. The inverse problem of electrocardiography: industrial solutions and simulations // JBEM. 2005. Vol. 7 (2). P. 191–194.
24. Asirvatham S., Packer D. L. Validation of non-contact mapping to localize the site of simulated pulmonary vein ectopic foci // Circulation. 2000. Vol. 102. P. 441–446.
25. Schilling R. J., Kadish A. H., Peters N. S. [et al.]. Endocardial mapping of atrial fibrillation in the human right atrium using a non-contact catheter // European Heart Journal. 2000. Vol. 21. P. 550–564. DOI: 10.1053/ehj.1999.1851.
26. Franzone P. C., Taccardi B., Viganotti C. An approach to inverse calculation of epicardial potentials from body surface maps // Adv. Cardiol. 1978. Vol. 21. P. 50–54.

27. Van Dam P. M., Oostendorp T. F., Linnenbank A. C., van Oosterom A. Non-Invasive Imaging of Cardiac Activation and Recovery // *Ann. Biomed. Eng.* 2009. Vol. 37. P. 1739–1756. DOI: 10.1007/s10439-009-9747-5.
28. Cluitmans M. J. M., Peeters R. L. M., Westra R. L., Volders P. G. A. Noninvasive reconstruction of cardiac electrical activity: update on current methods, applications and challenges // *Netherlands Hear. J.* 2015. Vol. 23. P. 301–311. DOI: 10.1007/s12471-015-0690-9.
29. Yao B., Yang H. Spatiotemporal regularization for inverse ECG modeling // *IIEE Trans. Healthc. Syst. Eng.* 2011. Vol. 11. P. 11–23. DOI: 10.1080/24725579.2020.1823531.
30. Sundnes J., Lines G. T., Cai X. [et al.]. Computing the Electrical Activity in the Heart // *Monographs in Computational Science and Engineering*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 332 p. ISBN 10 3-540-33432-7.
31. Mirams G. R., Arthurs C. J., Bernabeu M. O., Bordas R. [et al.]. Chaste: An open source C++ library for computational physiology and biology // *PLoS Comput. Biol.* 2013. Vol. 9 (3). e1002970. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1002970.
32. Pitt-Francis J., Pathmanathan P., Bernabeu M. O., Bordas R. [et al.]. Chaste: a test-driven approach to software development for biological modelling // *Comput. Phys. Commun.* 2009. Vol. 180 (12). P. 2452–2471. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.07.019.
33. Mihalef V., Mansi T., Rapaka S., Passerini T. Implementation of a patient-specific cardiac model // *Artificial Intelligence for Computational Modeling of the Heart*. 2020. P. 43–94. DOI: 10.1016/B978-0-12-817594-1.00012-7.
34. Сорокин А. Б., Баландина О. В., Полевая С. А. [и др.]. Связь спектральных характеристик ЭЭГ с тяжестью аутистических проявлений // *Современные технологии в медицине*. 2019. С. 84–89. DOI: 10.17691/stm2019.11.1.10.
35. Поликанова И. С., Сергеев А. В. Влиятельная длительной когнитивной нагрузки на параметры ЭЭГ // *Национальный Психологический Журнал*. 2014. № 1. С. 86–94.
36. Nagata K., Mizukami M., Araki G. [et al.]. Topographic electroencephalographic study of cerebral infarction using computed mapping of the EEG // *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*. 1982. Vol. 2 (1). P. 79–88. DOI: 10.1038/jcbfm.1982.9.
37. Гараев В. Р., Скоромец А. П., Любименко В. А. [и др.]. Амплитудно-интегрированная электроэнцефалография в неонатологии // *Педиатрия. Журнал им. Г. Н. Сперанского*. 2008. Т. 87, № 1. С. 10.
38. Majkowski J. Long-term treatment of amyotrophic lateral sclerosis with phthalazinol // *Advances in second messenger and phosphoprotein research*. 1992. Vol. 25. P. 409–416. DOI: 10.1001/archneur.1980.00500540098023.
39. Бокерия Л. А., Филатов А. Г. Картирование аритмий // *Анналы аритмологии*. 2012. Т. 9. № 1. С. 5–13. EDN: PBLUWF.
40. Zhikhareva G. V., Kramm M. N. Reconstruction of current sources of the heart in the inverse ECG problem. Algorithms and their analysis: monograph. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Germany, 2012. 156 p. ISBN 978-3-8473-3278-7.
41. Титомир Л. И. Электрический генератор сердца. Москва: Наука, 1980. 371 с.
42. Mishchenko K V., Avdeeva D. K., Yukhin Y. M., Titkov A. I., Logutenko O. A. Preparation of electroconductive aluminum-silicon oxide ceramic sensors modified with silver and bismuth nanoparticles // *European Journal of Nanomedicine*. 2016. Vol. 8. P. 195–202. DOI: 10.1515/ejnm-2016-0019.
43. Avdeeva D. K., Maksimov I. V., Ivanov M. L., Yuzhakov M. M., Turushev N. V., Rybalka S. A., Batalov R. E., Guo W., Philippova E. B. Results of measurements of the cardiac micropotential energies in the amplitude-time intervals recorded by the nanosensor-based hardware and software complex // *Measurement*. 2020. № 173. 108600. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108600.
44. Avdeeva D. K., Guo W., Nguyen D. Q., Yuzhakov M. M., Ivanov M. L., Turushev N. V., Maksimov I. V., Balakhonova M. V. Results of recording electrophysiological signals by nanosensors during tests on volunteers // *Sensor Review*. 2020. Vol. 40 (3). P. 335–346. 108600. DOI: 10.1108/SR-12-2019-0323.
45. Avdeeva D. K., Ivanov M. L., Yuzhakov M. M., Turushev N. V., Kodermyatov R. E., Maksimov I. V., Zimin I. A. Novel high-resolution nanosensor-based measuring equipment for ECG recording // *Measurement*. 2019. Vol. 146. P. 215–229. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.06.023.
46. Avdeeva D. K., Yuzhakov M. M., Ivanov M. L., Turushev N. V., Maksimov I. V., Kodermyatov R. E., Mazikov S. V., Guo W., Zimin I. A. Advanced features of ECG mapping // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. № 1327. 012027. DOI: 10.1088/1742-6596/1327/1/012027.
47. Avdeeva D. K., Maksimov I., Guo W., Ivanov M., Turushev N., Yuzhakov M., Enshin S., Mazikov S., Marchenko E., Balakhonova M. New Approaches to Stratification of Patients by the Level of Sudden Cardiac Death Risk Using the Data on Energies of Cardiac Micropotentials Obtained by Nanosensor-Based Hardware and Software Complex // *Progress in Material Science and Engineering. Studies in Systems, Decision and Control*. 2021. Vol. 351. P. 217–236. DOI: 10.1007/978-3-030-68103-6_20.
48. Avdeeva D. K., Maksimov I. V., Ivanov M. L., Yuzhakov M. M., Turushev N. V., Rybalka S. A., Batalov R. E., Guo W., Philippova E. B. Results of measurements of the cardiac micropotential energies in the amplitude-time intervals recorded by the nanosensor-based hardware and software complex // *Measurement*. 2020. 108600. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108600.

КОРНИЕНКО Александр Иванович, аспирант научно-производственной лаборатории «Медицинская инженерия» Томского политехнического университета (ТПУ), г. Томск.

SPIN-код: 8176-5519

AuthorID (РИНЦ): 1164449

AuthorID (SCOPUS): 24724450700

Адрес для переписки: kai757@mail.ru

АВДЕЕВА Диана Константиновна, доктор технических наук, профессор, заведующая научно-производственной лабораторией «Медицинская инженерия» ТПУ, г. Томск.

AuthorID (РИНЦ): 110323

AuthorID (SCOPUS): 6602380455

ORCID: 0000-0002-4696-3756

ResearcherID: J-6958-2013

Адрес для переписки: diana.avdeeva@mail.ru

ЮЖАКОВ Михаил Михайлович, кандидат технических наук, инженер научно-производственной лаборатории «Медицинская инженерия» ТПУ, г. Томск.

ORCID: 0000-0001-9642-602X

ResearcherID: A-5048-2014

SPIN-код: 7316-0080

AuthorID (SCOPUS): 57189381645

AuthorID (РИНЦ): 727556

Адрес для переписки: libra2000@yandex.ru

ИВАНОВ Максим Леонидович, кандидат технических наук, младший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Медицинская инженерия» ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 5036-2071

AuthorID (РИНЦ): 724459

AuthorID (SCOPUS): 56377173300

ORCID: 0000-0002-3039-2805

ResearcherID: G-8445-2013

Адрес для переписки: lydoz@mail.ru

ТУРУШЕВ Никита Владимирович, кандидат технических наук, инженер научно-производственной лаборатории «Медицинская инженерия» ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 4405-2762

AuthorID (РИНЦ): 724203

AuthorID (SCOPUS): 56377261600

ORCID: 0000-0003-3804-5979

ResearcherID: A-4767-2014

Адрес для переписки: nvtur90@mail.ru

ЕНЫШИН Степан Игоревич, аспирант научно-производственной лаборатории «Медицинская инженерия» ТПУ, г. Томск.

ORCID: 0000-0001-5645-3322

AuthorID (SCOPUS): 57211792938

Адрес для переписки: stepanomt@mail.ru

Для цитирования

Корниенко А. И., Авдеева Д. К., Южаков М. М., Иванов М. Л., Турушев Н. В., Енышин С. И. Наносенсоры для повышения разрешающей способности аппаратуры для ЭКГ и ЭЭГ картирования // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 122 – 128. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-122-128.

Статья поступила в редакцию 15.01.2023 г.

© А. И. Корниенко, Д. К. Авдеева, М. М. Южаков,
М. Л. Иванов, Н. В. Турушев, С. И. Енышин