

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

УДК 004.654

doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-10

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА АРИТМИИ

В. А. Гасанова¹, А. В. Пушкарева²

^{1,2} Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия
¹veronicka6949@yandex.ru, ²a.v.push89@gmail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Обнаружение аритмии считается основой диагностики сердечно-сосудистых заболеваний в настоящее время. Аритмия может быть вызвана различными факторами, такими как заболевания сердца, прием лекарств, стресс, в некоторых случаях аритмия может быть опасной для жизни, поэтому задача ее своевременного выявления и лечения крайне актуальна. Нестационарная природа и вариативность сигналов ЭКГ у разных пациентов обуславливают отсутствие универсального подхода для выявления аритмий в момент их возникновения. Разработанные методы выделения и классификации признаков аритмии, реализованные в автоматизированных системах контроля аритмии, оптимизируют работу врачей в задачах диагностики, анализируя электрокардиограммы (ЭКГ) и другие данные для выявления признаков аритмии. Существующие автоматизированные системы диагностики аритмии основаны на использовании алгоритмов машинного обучения для анализа ЭКГ, и выделяют признаки, характерные для различных видов аритмии. Целью работы является разработка структурной схемы автоматизированной системы мониторинга аритмии, анализ основных методов анализа variability сердечного ритма и использование адаптируемых пороговых значений на примере сигнала ЭКГ при патологии. *Материалы и методы.* Проанализированы существующие автоматизированные системы диагностики аритмии, обоснована необходимость персонализации большого и репрезентативного набора данных пациентов, включая пол, возраст, хронические заболевания, данные всех предшествующих ЭКГ. *Результаты.* Предложена структура автоматизированной персонализированной системы мониторинга аритмии с интеграцией личной медицинской информации и использовании искусственного интеллекта. *Заключение.* Разработана структурная схема автоматизированной системы мониторинга аритмии, проанализированы основные методы анализа variability сердечного ритма использован адаптируемый порог по возрасту пациента на примере сигнала ЭКГ при аритмии.

Ключевые слова: аритмия, персонализация, мониторинг, автоматизированная система, классификация аритмии, телемедицинские системы и технологии, персонализированная диагностика, электрокардиограмма

Для цитирования: Гасанова В. А., Пушкарева А. В. Автоматизированная персонализированная система мониторинга аритмии // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 81–87. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-10

AUTOMATED PERSONALIZED ARRHYTHMIA MONITORING SYSTEM

V.A. Gasanova¹, A.V. Pushkareva²

^{1,2} Penza State Technological University, Penza, Russia
¹veronicka6949@yandex.ru, ²a.v.push89@gmail.ru

Abstract. *Background.* The detection of arrhythmia is considered the basis for the diagnosis of cardiovascular diseases at the present time. Arrhythmia can be caused by various factors, such as heart disease, medication, stress, in some cases, arrhythmia can be life-threatening, so the task of its timely detection and treatment is extremely urgent. The non-

stationary nature and variability of the electrocardiogram form in different patients leads to the lack of a universal approach for detecting arrhythmias at the time of their occurrence. The developed methods for identifying and classifying signs of arrhythmia, implemented in automated arrhythmia monitoring systems, optimize the work of doctors in diagnostic tasks by analyzing electrocardiograms and other data to identify signs of arrhythmia. The existing automated systems for the diagnosis of arrhythmia are based on the use of machine learning algorithms for the analysis of an electrocardiogram, and identify signs characteristic of electrocardiogram analysis, and identify signs characteristic of various types of arrhythmias. The aim of the work is to develop the structure of an automated arrhythmia monitoring system, analyze the main methods for analyzing heart rate variability and use adaptable threshold values using the example of an electrocardiogram in pathology. *Materials and methods.* The study materials were electrocardiograms with arrhythmia episodes from certified databases. The study was conducted using mathematical statistics methods. *Results.* The structure of an automated personalized arrhythmia monitoring system with the integration of personal medical information and the use of artificial intelligence is proposed. *Conclusion.* The structure of an automated arrhythmia monitoring system has been developed, the main methods of analyzing heart rate variability have been analyzed and an adaptable threshold for patient age has been used on the example of an electrocardiogram for arrhythmia.

Keywords: arrhythmia, personalization, monitoring, automated system, arrhythmia classification, telemedicine system, personalized diagnostics, electrocardiogram

For citation: Gasanova V.A., Pushkareva A.V. Automated personalized arrhythmia monitoring system. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):81–87. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-10

Введение

Одним из жизненно важных органов является сердце [1]. Во всем мире заболевания сердечно-сосудистой системы (ССС) человека до сих пор являются главной причиной смертности и инвалидности населения [2]. В последние два десятилетия отчетливо наблюдается тенденция по увеличению частоты и тяжести этих заболеваний, которые все чаще встречаются в любом возрасте [3].

Выявление аритмии является основой диагностики сердечно-сосудистых заболеваний по причине возможного увеличения частоты инсультов, внезапной сердечной смерти и их осложнений [4].

В настоящее время внимание общества фокусируется на IT-технологиях, совмещающих в себе мобильность и возможность удаленной работы [5] при мониторинге состояния аритмий.

Специализированные приложения и сенсорные датчики, интегрированные в мобильные устройства связи или используемые в дополнение к ним, позволяют пользователям отслеживать, собирать и обмениваться данными, отражающими физиологические параметры и сведения о состоянии здоровья [6].

Несмотря на все достижения по улучшению качества диагностики аритмии с помощью автоматизированных систем [7], существующие системы имеют ряд недостатков: низкая точность диагностики редких или сложных форм аритмии, низкая надежность при использовании в домашних условиях, высокая стоимость, необходимость обучения врачей и отсутствие персонализации.

В настоящее время ведется активная работа по совершенствованию этих систем, направленная на повышение их точности, надежности и интерпретируемости результатов электрокардиографического обследования.

Материалы и методы

Рассматривая метод дискретного ортогонального преобразования Стоквелла (ДОПС) [8], который позволяет эффективно выделять признаки из ЭКГ сигналов для последующего анализа и классификации, можно отметить, что, как и все существующие методы по обработке и классификации аритмии, ДОПС имеет недостатки в виде сложности выбора параметров преобразования (шаг дискретизации, чувствительности к шумам и артефактам в данных ЭКГ).

Реализация автоматизированной персонализированной системы мониторинга [8] аритмии позволит минимизировать влияние шумов и артефактов на качество анализа, что особенно важно для точной диагностики аритмий.

Повышение помехоустойчивости при обработке электрокардиосигнала позволяет повысить достоверность автоматических заключений, что способствует повышению качества диагностики сердечно-сосудистых заболеваний, в частности аритмий [9], а объединение информационных и статистических параметров распределений открывает новые возможности оценки параметров моделей стохастических процессов [10].

Помимо основных расчетов, используемых для анализа сигнала ЭКГ, таких как расчет сердечного ритма в ударах, нормализованного QT -интервала, PR -интервала, ST -интервала и амплитуд QRS -комплекса, T -волны и P -волны, в автоматизированной персонализированной системе мониторинга аритмий необходимо использовать алгоритм анализа ВСП, адаптированный под индивидуальные характеристики пациента. Основные формулы для расчета ВСП, используемые в алгоритме работы автоматизированной персонализированной системы мониторинга аритмии, представлены ниже:

1. Стандартное отклонение всех RR -интервалов ($CO RR$):

$$CO RR = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (RR_i - \overline{RR})^2}, \quad (1)$$

где RR_i – длительность i -го RR -интервала; \overline{RR} – среднее значение длительности всех RR -интервалов; N – общее количество RR -интервалов.

2. Среднее квадратичное отклонение последовательных различий между RR -интервалами (СКОПР RR):

$$СКОПР RR = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (RR_{i+1} - RR_i)^2}. \quad (2)$$

3. Процент RR -интервалов, различающихся более чем на 50 мс от предыдущего интервала ($pRR50$):

$$pRR50 = \left(\frac{\text{количество } |RR_{i+1} - RR_i| > 50 \text{ мс}}{N-1} \right) \cdot 100 \%. \quad (3)$$

4. Частотный анализ ВСП, включающий измерение мощности в трех основных диапазонах: менее 0,04 Гц (очень низкая частота); от 0,04 до 0,15 Гц (низкая частота); от 0,15 до 0,4 Гц (высокая частота).

Ниже представлен сигнал ЭКГ в норме и с патологией (фибриляция предсердий) с применением основных методов анализа ВСП в MATLAB (рис. 1–3).

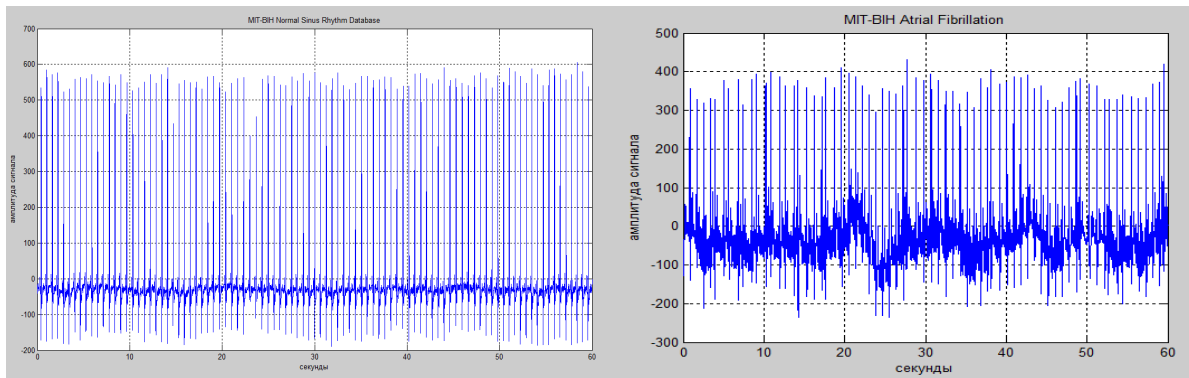


Рис. 1. Сигнал ЭКГ в норме и при патологии

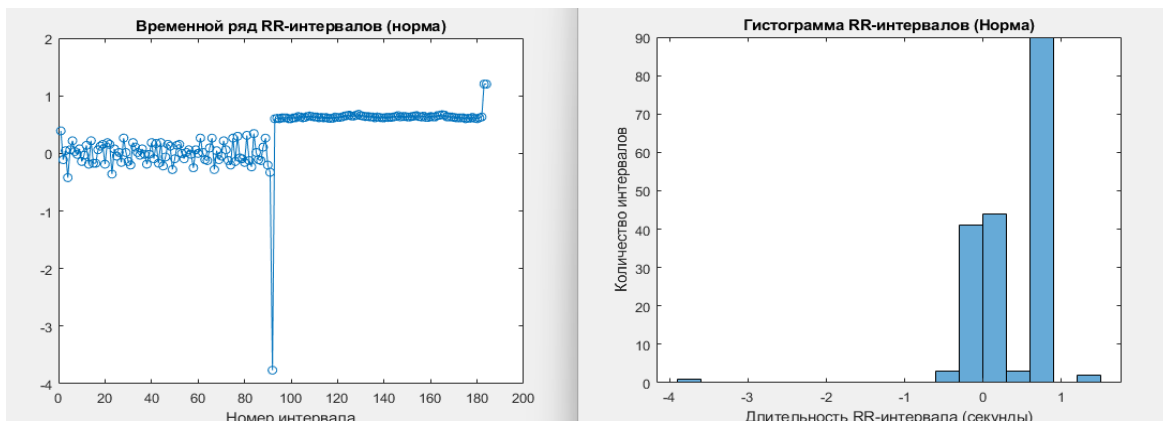


Рис. 2. Временной ряд и гистограмма распределения длительностей RR -интервалов в норме ($CO RR$: 0,46 с, $СКОПР RR$: 0,45 с)

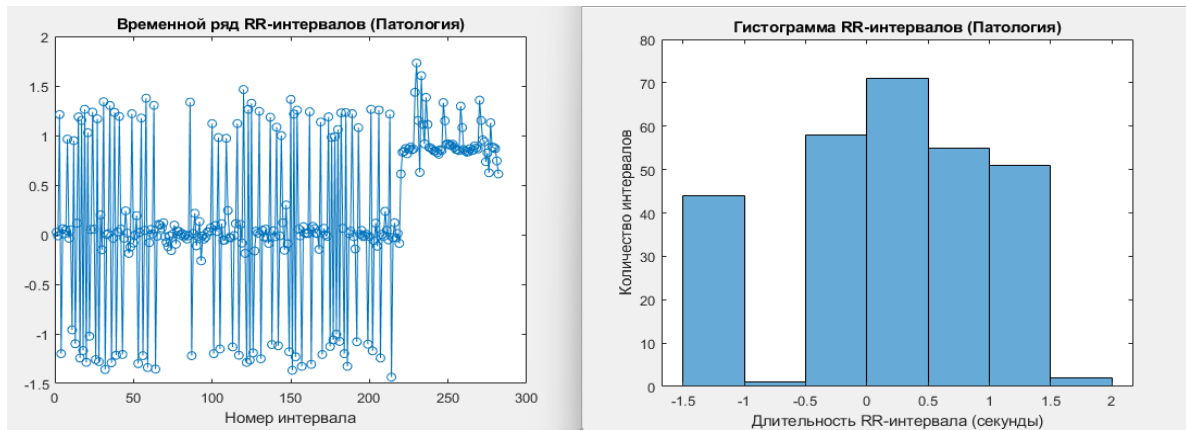


Рис. 3. Временной ряд и гистограмма распределения длительностей RR-интервалов при патологии (CO RR: 0,8 с, СКОПР RR: 1,2 с)

Данные, которые были получены в результате анализа ВСР, указывают на умеренную общую ВСР нормы, что свидетельствует о достаточной адаптации автономной нервной системы к внешним и внутренним воздействиям в отличие от патологии (фибрилляция предсердий). Значения СКОПР RR нормы указывают на нормальную активность парасимпатической нервной системы, а значения СКОПР RR при патологии значительно выше нормы, что может указывать на чрезмерную активность парасимпатической нервной системы.

Представленных расчетов недостаточно для индивидуального анализа сердечного ритма. Соответственно, для персонализированного мониторинга после основных расчетов и действий по обработке сигнала необходимо сделать анализ ВСР более персонализированным, исходя из индивидуальных параметров и историй медицинских данных пользователя. Рассматриваемую задачу возможно реализовать с помощью применения адаптируемых порогов для анализ ВСР (рис. 4).

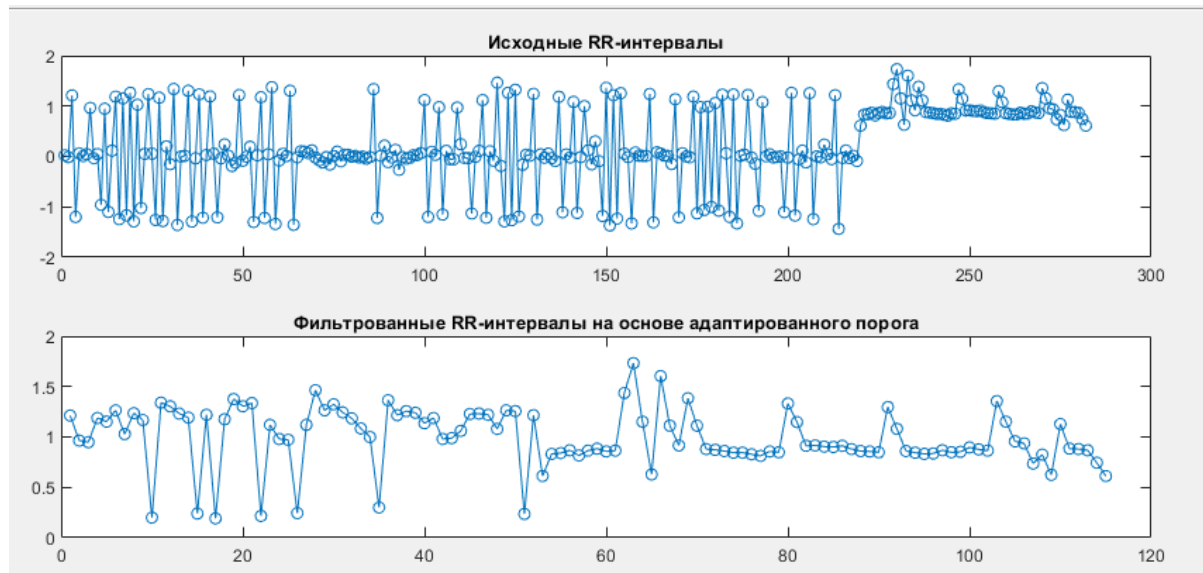


Рис. 4. Фрагмент использования адаптируемого возрастного порога (30 лет) на примере сигнала ЭКГ при аритмии (фибрилляция предсердий)

На рис. 4 представлен фрагмент использования адаптируемых порогов в среде Matlab, в качестве порога использовался показатель возраста (была выбрана условная конструкция). Разработан алгоритм, который позволяет присваивать разные пороговые значения в зависимости от условия (например, возраст пользователя 30 лет). На нижнем рисунке видны только те RR -интервалы, которые превышают порог (30 лет) и, как следствие, график выглядит более ровным.

Данных подход позволяет создать более гибкую и персонализированную систему мониторинга ВСП, которая может быть адаптирована под конкретного пользователя в автоматизированной персонализированной системе мониторинга аритмии.

Результаты

Автоматизированная персонализированная система мониторинга аритмии имеет сложную структуру, которая включает в себя несколько компонентов, работающих в тесном взаимодействии (рис. 5).

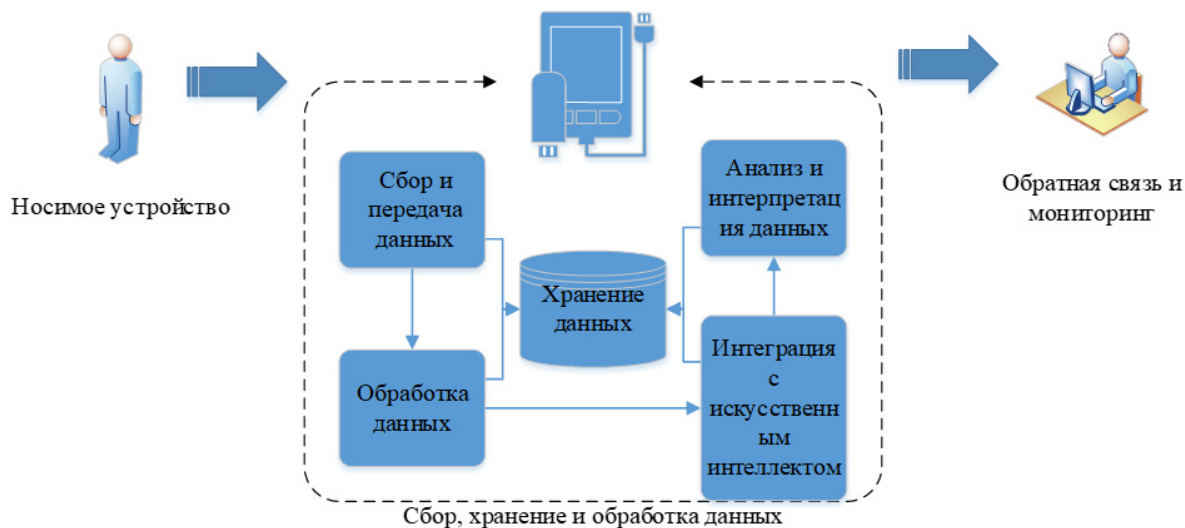


Рис. 5. Структура автоматизированной персонализированной системы мониторинга аритмии

Представленная структура автоматизированной персонализированной системы мониторинга аритмии на рис. 5 состоит из носимого устройства, служащего для записи сердечного ритма и регистрации электрокардиограммы, блока «Сбор и передача данных», который отвечает за сбор данных с носимого устройства и их передачу (осуществляется по беспроводной сети и в режиме реального времени) для дальнейшего анализа, а в блоке «Обработка данных», собранная информация подвергается предварительной обработке, которая включает в себя фильтрацию шума, анализ ВСП с применением адаптируемых порогов, которые учитывают индивидуальные особенности пользователя.

Блок «Анализ и интерпретация данных» реализует работу алгоритмов и методов машинного обучения, для адаптации под личные медицинские данные пользователя, далее информация поступает в блок «Интеграция с искусственным интеллектом», который используется для усовершенствования процесса анализа данных, обучаясь на большом количестве данных. Все данные, подвергающиеся обработке и анализу, сохраняются для дальнейшего использования, а обратная связь и мониторинг обеспечивают пользователю предоставление информации о состоянии его здоровья.

Интеграция личной медицинской информации в структуре, представленной на рис. 5, обеспечивает индивидуальный подход к анализу данных, что повышает точность диагностики и эффективности мониторинга, а использование искусственного интеллекта, опираясь на детальный анализ и обучение, позволяет повысить качество и быстроту мониторинга аритмий.

Структура автоматизированной персонализированной системы мониторинга аритмии настроена на учет индивидуальных особенностей каждого пациента, а способность системы обеспечивать обратную связь позволяет быстро реагировать на потенциальные проблемы.

Обсуждение

Ожидается развитие автоматизированных персонализированных систем контроля аритмии в таких направлениях, как использование более мощных и эффективных алгоритмов машинного обучения, использование более крупных наборов данных ЭКГ для обучения алгоритмов машинного обучения, разработка методов автоматизированной диагностики аритмии, учитывающих более широкий спектр индивидуальных особенностей пациента и развитие

автоматизированных персонализированных систем контроля аритмии позволит улучшить качество диагностики и лечения аритмии.

Заключение

В результате работы разработана структурная схема автоматизированной персонализированной системы мониторинга аритмии, которая включает в себя носимое устройство, сбор и передачу данных, хранение данных, обработку данных, интеграцию с искусственным интеллектом, анализ и интерпретацию данных и обратную связь.

Анализ основных методов ВСП показал существующие недостатки в виде сложности выбора параметров преобразования, таких как шаг дискретизации, чувствительности к шумам и артефактам в данных ЭКГ.

Проведенный анализ сигналов ЭКГ в норме и патологии показал разницу между $CO RR$ (в норме – 0,46, при патологии – 0,8) и $СКОПР RR$ (в норме – 0,45, при патологии – 1,2), которая указывает на повышенную вариабельность сердечного ритма (при патологии).

Представленных данных недостаточно для точной постановки диагноза, что приводит к необходимости использования персонализируемых адаптируемых порогов при обработке сигналов ЭКГ.

Отфильтрованные данные сигнала ЭКГ в результате использования адаптируемого показателя (возраста) могут эффективно использоваться для оценки состояния вегетативной нервной системы и потенциального выявления патологий сердца.

Список литературы

1. Sraitih M., Jabrane Y., Hajjam El Hassani. A. An Automated System for ECG Arrhythmia Detection Using Machine Learning Techniques // *J. Clin. Med.* 2021. Vol. 10. P. 5450. doi: 10.3390/jcm10225450
2. Heron M. Deaths: Leading Causes for 2013 // *Natl Vital Stat Rep.* 2016. Vol. 65. P. 1–95. PMID: 26906146.
3. Roth G. A., Forouzanfar M. H., Moran A. E. [et al.]. Demographic and epidemiologic drivers of global cardiovascular mortality // *N Engl J Med.* 2015. Vol. 372, № 14. P. 1333–1341. doi: 10.1056/NEJMoa1406656. PMID: 25830423 ; PMID: PMC4482354
4. Kingma J, Simard C, Drolet B. Overview of Cardiac Arrhythmias and Treatment Strategies // *Pharmaceuticals (Basel)*. 2023. Vol. 16, № 6. P. 844. doi: 10.3390/ph16060844. PMID: 37375791; PMID: PMC10301085
5. Балахонова С. А., Бодин О. Н., Логинов Д. С. [и др.]. Организация распределенной системы диагностики состояния сердца // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль.* 2016. № 2 (16). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-raspredelennoy-sistemy-diaagnostiki-sostoyaniya-serdtsa> (дата обращения: 12.04.2024).
6. Varma N., Cygankiewicz I., Turakhia M. P. [и др.]. Контроль аритмий с помощью технологий мобильного здравоохранения: цифровые медицинские технологии для специалистов по сердечному ритму. Консенсус экспертов 2021 // *Российский кардиологический журнал.* 2021. № S1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontrol-aritmiy-s-pomoschyu-tehnologiy-mobilnogo-zdravoohraneniya-tsifrovye-meditsinskie-tehnologii-dlya-spetsialistov-po> (дата обращения: 24.04.2024).
7. Sraitih M., Jabrane Y., Hajjam El Hassani A. An Automated System for ECG Arrhythmia Detection Using Machine Learning Techniques // *J. Clin. Med.* 2021. Vol. 10. P. 5450. doi: 10.3390/jcm10225450
8. Raj S., Ray K. C. A Personalized Arrhythmia Monitoring Platform // *Sci Rep.* 2018. Vol. 30, № 8. P. 11395. doi: 10.1038/s41598-018-29690-2. PMID: 30061754; PMID: PMC6065378
9. Бодин А. Ю., Крамм М. Н., Кривоногов Л. Ю. [и др.]. Классификация электрокардиографических помех и разработка способа сегментации электрокардиосигнала // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль.* 2023. № 4. С. 64–71. doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-8
10. Полосин В. Г., Бодин О. Н. Применение энтропийно-параметрического потенциала для мониторинга результатов электрофизиологических характеристик сердца // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль.* 2015. № 4 (14). С. 3–9.

References

1. Sraitih M., Jabrane Y., Hajjam El Hassani. A. An Automated System for ECG Arrhythmia Detection Using Machine Learning Techniques. *J. Clin. Med.* 2021;10:5450. doi: 10.3390/jcm10225450
2. Heron M. Deaths: Leading Causes for 2013. *Natl Vital Stat Rep.* 2016;65:1–95. PMID: 26906146.
3. Roth G.A., Forouzanfar M.H., Moran A.E. et al. Demographic and epidemiologic drivers of global cardiovascular mortality. *N Engl J Med.* 2015;372(14):1333–1341. doi: 10.1056/NEJMoa1406656. PMID: 25830423 ; PMID: PMC4482354

4. Kingma J, Simard C, Drolet B. Overview of Cardiac Arrhythmias and Treatment Strategies. *Pharmaceuticals (Basel)*. 2023;16(6):844. doi: 10.3390/ph16060844. PMID: 37375791; PMCID: PMC10301085
5. Balakhonova S.A., Bodin O.N., Loginov D.S. et al. Organization of a distributed system for diagnosing the state of the heart. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2016;(2). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-raspredeleyennoy-sistemy-diagnostiki-sostoyaniya-serdtsa> (accessed 12.04.2024).
6. Varma N., Cygankiewicz I., Turakhia M. P. et al. Arrhythmia control using mobile healthcare technologies: digital medical technologies for heart rhythm specialists. Consensus of experts 2021. *Rossiyskiy kardiologicheskiy zhurnal = Russian Journal of Cardiology*. 2021;(S1). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontrol-aritmiy-s-pomoschyu-tehnologiy-mobilnogo-zdravoohraneniya-tsifrovye-meditsinskie-tehnologii-dlya-spetsialistov-po> (accessed 24.04.2024).
7. Sraitih M., Jabrane Y., Hajjam El Hassani A. An Automated System for ECG Arrhythmia Detection Using Machine Learning Techniques. *J. Clin. Med*. 2021;10:5450. doi: 10.3390/jcm10225450
8. Raj S., Ray K.C. A Personalized Arrhythmia Monitoring Platform. *Sci Rep*. 2018;30(8):11395. doi: 10.1038/s41598-018-29690-2. PMID: 30061754; PMCID: PMC6065378
9. Bodin A.Yu., Kramm M.N., Krivonogov L.Yu. et al. Classification of electrocardiographic interference and development of a method for segmentation of the electrocardiosignal. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(4):64–71. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-8
10. Polosin V.G., Bodin O.N. Application of entropy-parametric potential for monitoring the results of electrophysiological characteristics of the heart. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2015;(4):3–9. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Вероника Алексеевна Гасанова

аспирант,
инженер кафедры биомедицинской инженерии,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: veronicka6949@yandex.ru

Veronika A. Gasanova

Postgraduate student,
engineer of the sub-department
of biomedical engineering,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukova passage/Gagarina street,
Penza, Russia)

Анастасия Валерьевна Пушкарёва

кандидат технических наук,
доцент кафедры биомедицинской инженерии,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: a.v.push89@gmail.ru

Anastasiya V. Pushkareva

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of biomedical engineering,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukova passage/Gagarina street,
Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 20.06.2024

Поступила после рецензирования / Revised 15.07.2024

Принята к публикации / Accepted 05.08.2024