

*В. И. Волчихин, М. А. Митрохин, А. В. Кузьмин,
М. И. Сафронов, О. Н. Бодин, Н. Ю. Митрохина, А. Ю. Тычков*

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ МОБИЛЬНОГО МОНИТОРИНГА¹

Аннотация.

Актуальность и цели. Заболевания сердечно-сосудистой системы представляют собой важную медицинскую и социальную проблему. Одним из возможных средств снижения последствий заболеваний сердца является использование мобильных средств мониторинга электрокардиосигналов, которые позволяют производить анализ электрокардиосигнала на протяжении продолжительного времени в условиях повседневной жизни. Объект исследования – мобильные системы мониторинга электрокардиосигналов. Предмет исследования – технические средства реализации основных этапов мониторинга.

Материалы и методы. Исследования выполнены с использованием теории обработки сигналов, анализа и обработки информации, системного анализа, а также методов разработки прикладного программного обеспечения информационно-вычислительных систем на основе мобильных вычислительных платформ.

Результаты. Разработаны и проанализированы: 1) архитектура системы мобильного мониторинга электрокардиосигналов; 2) требования к основным компонентам системы; 3) особенности длительного мониторинга электрокардиосигналов; 4) схема обработки данных для системы мобильного мониторинга.

Выводы. Предложенные технические средства для мобильного мониторинга электрокардиосигналов учитывают специфику длительной регистрации сигнала в условиях свободной двигательной активности. Применение данных средств позволит разрабатывать портативные системы контроля работы сердца на современных мобильных платформах для использования широким кругом пользователей.

Ключевые слова: электрокардиосигнал, мониторинг, фильтрация, помехи, мобильная платформа, мобильное устройство, сервер.

*V. I. Volchikhin, M. A. Mitrokhin, A. V. Kuz'min,
M. I. Safronov, O. N. Bodin, N. Yu. Mitrokhina, A. Yu. Tychkov*

FEATURES OF PROCESSING OF ELECTROCARDIOSIGNALS IN MOBILE MONITORING SYSTEMS

Abstract.

Background. Cardiovascular diseases form an important medical and social problem. One of possible factors of decreasing of negative consequences of heart diseases is an application of mobile means of monitoring of electrocardiosignals that allow to analyze a signal during continuous time in everyday life conditions. The

¹ Статья подготовлена при поддержке Российского научного фонда (мероприятие «Проведение исследований научными группами под руководством молодых ученых» Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми учеными, номер проекта 17-71-20029).

object of the research is mobile system for monitoring of electrocardiosig. The object of the research is the set of technical means for performing of main stages of the monitoring.

Materials and methods. Research is based on the theory of signal processing, information processing, system analysis and methods of development of application of information and computing systems on mobile platforms.

Results. Developed and analyzed: 1) architecture of mobile electrocardiosignals monitoring system; 2) main requirements to system components; 3) specificity of continuous electrocardiosignals monitoring; 4) data processing scheme for mobile monitoring system.

Conclusions. Proposed technical means of mobile electrocardiosignals monitoring take into account the specificity of continuous recording of signal in a free movement conditions. Application of these means allows to develop portative systems for heart control on up-to-date mobile platforms for wide range of users.

Key words: electrocardiosignal, monitoring, filtering, noise, mobileplatform, mobile device, server

Введение

Заболевания сердечно-сосудистой системы представляют собой важную медицинскую и социальную проблему, поскольку являются самой распространенной причиной смерти и потери трудоспособности. Они часто характеризуются скоротечностью и могут приводить к летальному исходу [1]. В настоящее время наиболее распространенные нарушения деятельности сердечно-сосудистой системы связаны с повышенным артериальным давлением, острым коронарным синдромом, а также патологическими изменениями сердечного ритма и проводимости.

Современные технические средства, применяемые в области медицины, позволяют собирать и накапливать большие объемы диагностических данных, которые могут использоваться для оценки состояния и прогнозирования течения заболевания с использованием методов обработки сигналов, распознавания образов и анализа информации.

1. Состояние вопроса

Одним из возможных средств снижения последствий заболеваний сердца является использование портативных приборов мониторинга сердечной активности. Такие устройства позволяют производить анализ электрокардиосигнала (ЭКС) на протяжении продолжительного времени и обнаруживать признаки опасных состояний сердца до того, как пациенту нанесен серьезный вред.

Известны следующие системы, которые позволяют регистрировать и обрабатывать ЭКС в режиме свободной двигательной активности (СДА):

- AliveCor's Heart Monitor [2];
- Metria Wearable Sensor [3];
- eMotion ECG Mobile [4].

Обзор современного состояния вопроса позволяет заключить, что выявление признаков опасных отклонений в работе сердца имеет особое значение в условиях повседневной жизни человека, что предполагает использование в условиях СДА, когда пользователь может не ощущать каких-либо симптомов заболеваний и сохранять обычную или высокую физическую ак-

тивность. Рассмотренные известные технические решения для мобильного мониторинга ЭКС в условиях СДА не обладают возможностью автономного выявления признаков опасных отклонений в регистрируемых ЭКС.

2. Подход и требования к решению

На рис. 1 приведена общая архитектура мобильной системы мониторинга ЭКС [5], которая включает устройство регистрации ЭКС, мобильное вычислительное устройство и удаленный сервер медицинского учреждения.

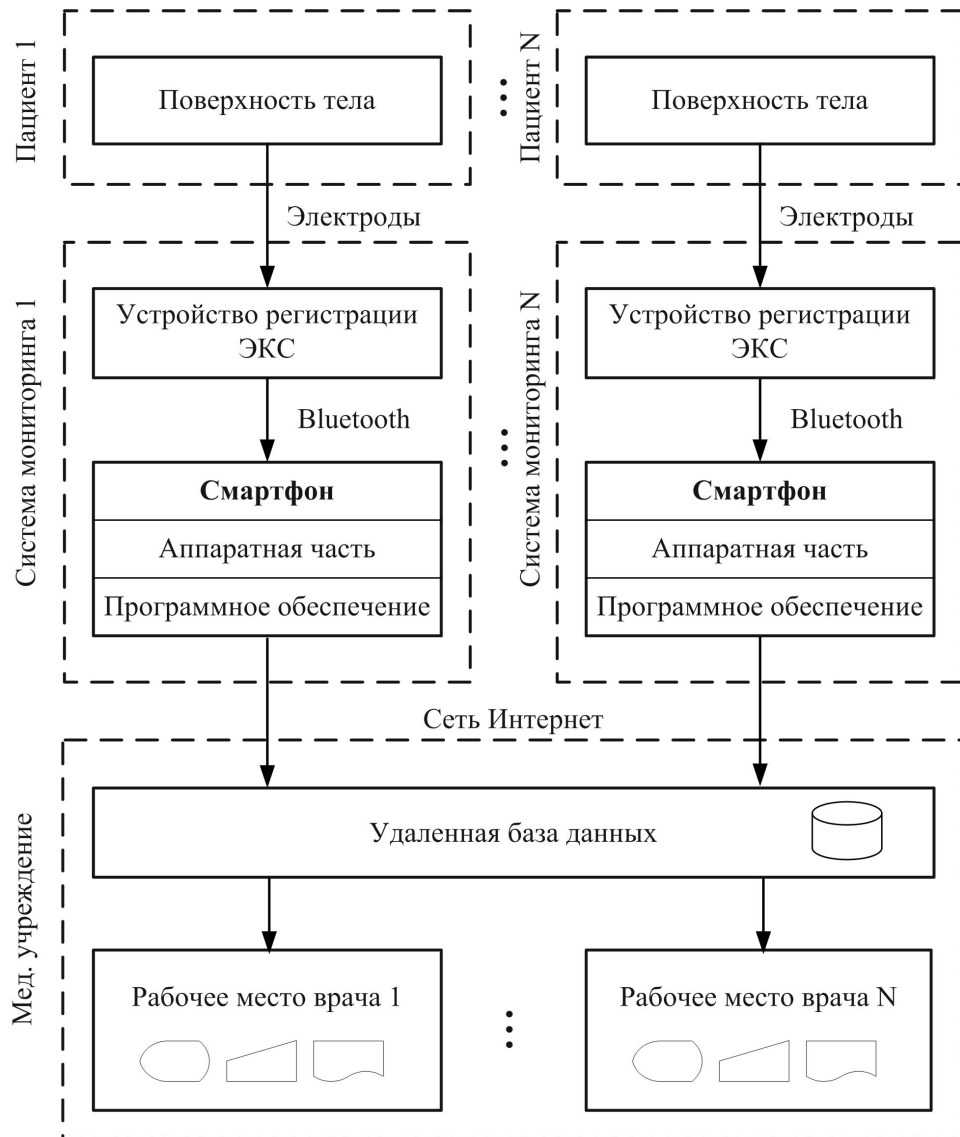


Рис. 1. Архитектура системы мониторинга

Каждое портативное устройство регистрации ЭКС осуществляет регистрацию, предварительную обработку, хранение и передачу ЭКС для последующего анализа.

Смартфон используется в качестве мобильной вычислительной платформы для анализа ЭКС. Специальное программное приложение осуществляет запись сигналов в базу данных, анализ и визуализацию сигналов, передачу результатов анализа на удаленный сервер [6] или другое мобильное устройство. Анализ осуществляется для выявления отклонений сердечной деятельности человека и прогнозирования возникновения угрожающих жизни состояний.

Для реализации взаимодействия каждого отдельного портативного устройства регистрации ЭКС и распределенного сервера могут использоваться защищенные соединения по протоколу SOAP. При обнаружении в ЭКС признаков опасных состояний сердца, например признаков аритмии, требуется дополнительный анализ данного участка ЭКС профильным медицинским специалистом (врачом-кардиологом). Реализация данной функции требует передачи данного ЭКС с обнаруженными отклонениями на удаленный сервер медицинского учреждения, откуда выполняется передача информации на стационарный терминал, представляющий собой рабочее место кардиолога или другого лечащего врача.

Среди общих требований к таким системам [7] наиболее актуальными являются: автоматизированное обнаружение признаков опасных состояний сердца в режиме оффлайн (без подключения к удаленному серверу), удобство для конечных пользователей (минимальные требования к квалификации пользователей в области медицинских знаний и специальных навыков) и создание общего информационного пространства, обеспечивающего централизованное хранение информации, управление и доступ к ней.

Современные системы мобильного мониторинга рассчитываются на условия СДА, порождающей ряд специфических особенностей и ограничений, которые следует принимать во внимание в процессе разработки новых систем и устройств подобного назначения.

3. Особенности продолжительного мониторинга ЭКС

Анализ ЭКС, регистрируемых в процессе длительного непрерывного мониторинга, имеет ряд особенностей по сравнению с лабораторной регистрацией. Эти особенности связаны в основном с процессом их получения. Среди этих особенностей [7] необходимо выделить:

- 1) сокращенное число отведений ЭКС;
- 2) высокий уровень помех и артефактов;
- 3) ограниченное время автономной работы устройства.

Длительный мониторинг в процессе повседневной жизнедеятельности человека включает эпизоды физической активности различной интенсивности, которая может приводить к изменению параметров контакта отведения с поверхностью тела вплоть до полного его прерывания. Такие участки сигнала могут оказывать существенное влияние на результаты последующего анализа, например на оценку вариабельности сердечного ритма. Поэтому такие особенности сигнала должны быть исключены из анализа.

Другая проблема во время мониторинга ЭКС возникает, когда человек контактирует с электро- и радиооборудованием. Некоторое оборудование способно генерировать элетромагнитные помехи, влияющие на регистрируе-

мый ЭКС. Такие помехи могут быть постоянно действующими либо появляться эпизодически.

Для фильтрации помех в стационарном регистрирующем оборудовании используются фильтры, которые направлены в основном на устранение дрейфа изолинии (низкочастотные фильтры 0,5...1 Гц), фильтрацию сетевой помехи (режекторный фильтр 50...60 Гц) и артефактов мышечного тремора (антитреморный фильтр частоты 35 Гц), но они неспособны подавлять помехи других видов, возникающих при мобильном мониторинге. В системе мобильного мониторинга необходимо осуществлять фильтрацию для устранения влияния помех различных, заранее неизвестных источников.

4. Схема обработки ЭКС в мобильной системе мониторинга

Схема обработки сигнала мобильного кардиомонитора должна включать этапы регистрации ЭКС, предварительной обработки и непосредственно анализа сигнала (рис. 2).

На этапе регистрации ЭКС электрические потенциалы в точках отведений на поверхности тела человека регистрируются с необходимой частотой (для систем суточного мониторинга достаточной частотой является 500 Гц), усиливаются и преобразуются в цифровой вид.

Этап предварительной обработки заключается в выделении участков сигнала с аномальными значениями для исключения их из последующего анализа и в фильтрации помех в сигнале.

Для выделения аномальных значений электрокардиосигнала могут использоваться специальные индикаторы и/или статистические параметрические и непараметрические тесты [8, 9].

Для фильтрации сигналов целесообразно применять мощные методы, основанные на анализе самого сигнала, которые позволяют выделять особенности ЭКС конкретного человека и использовать их при фильтрации помех. К классу таких методов относятся: сингулярный спектральный анализ, методы локальной аппроксимации, анализ эмпирических мод и др.

В настоящее время значительное внимание уделяется разработке новых алгоритмов подавления помех, присутствующих в ЭКС, в том числе на основе аппарата декомпозиции сигнала на эмпирические моды (ЭМ) и спектра Гильберта [10]. Наиболее простым вариантом является удаление одной или двух ЭМ самой низкой частоты и последующем восстановлении исходного сигнала для фильтрации низкочастотных (НЧ) помех. В случае разложения пяти кардиоциклов ЭКС с частотой дискретизации 500 Гц в частотный диапазон НЧ помехи попадают две НЧ ЭМ сигнала: $m(k-1)$ и $m(k)$ на промежутке $[1, t_k]$, тогда

$$f(t) = \sum_{i=(v-2)}^{v-1} f_i(t) - r_v(t), \quad (1)$$

где $f_i(t)$ – ЭМ; i – номер ЭМ; t – дискретные временные отсчеты кардиоцикла; $t \in [1, t_k]$; k – завершающий временной отсчет кардиоцикла; $r_v(t)$ – остаток.

Для подавления высокочастотных (ВЧ) помех на ЭКС также может использоваться декомпозиция сигнала на ЭМ. Для этого могут использоваться алгоритмы, которые анализируют поверхности энергетической плотности

(ПЭП) [10]. Удаление из сигнала областей ПЭП с низкой энергией выражается следующим образом:

$$E_{f_j}(t_i) = E'_{f_j}(t_i) - P_{f_j}(t_i), \quad (2)$$

где $E'_{f_j}(t_i)$ – ПЭП ВЧ составляющей ЭКС; $P_{f_j}(t_i)$ – локальная ПЭП; $E_{f_j}(t_i)$ – полученная ПЭП ЭКС; f_j – j частота; t – временные отсчеты, j – количество отсчетов по каждой ЭМ $i, j = 1 \dots k$.

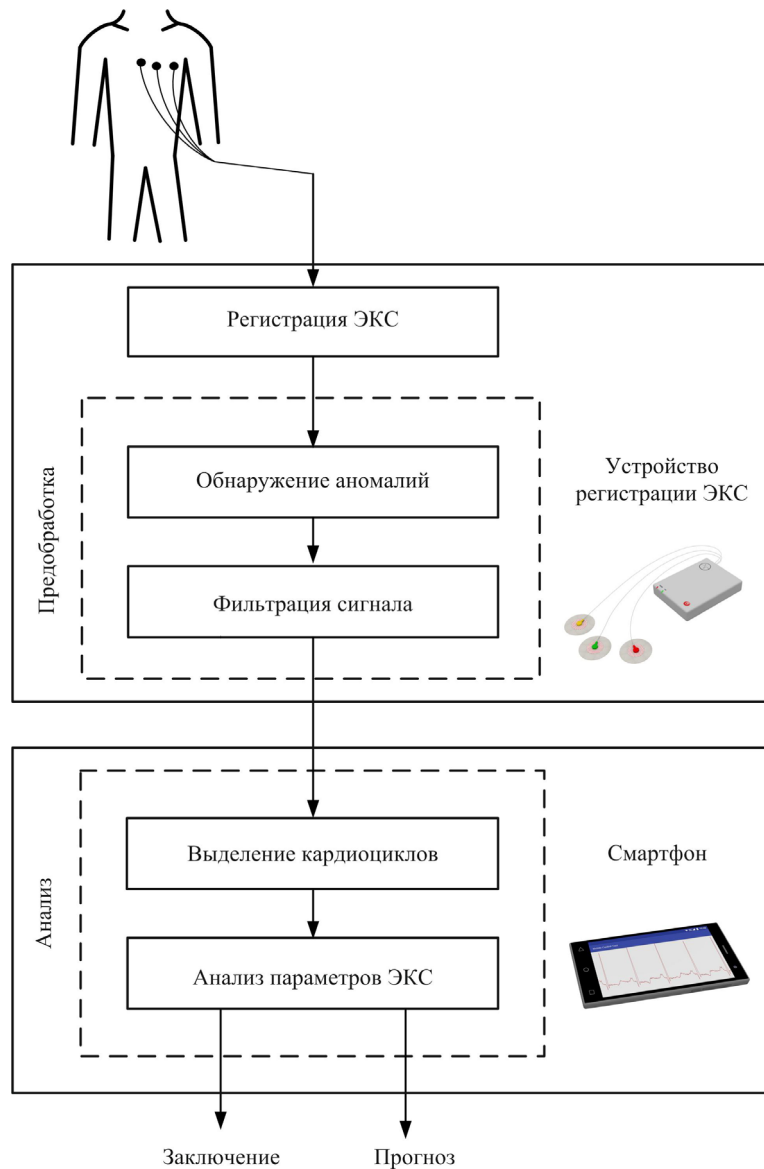


Рис. 2. Схема обработки ЭКС

Пример использования указанных методов фильтрации ВЧ и НЧ помех ЭКС показан на рис. 3.

На этапе анализа в ЭКС выделяются информативные параметры [11]. Для анализа параметров ЭКС и прогнозирования угрожающих состояний применяются интеллектуальные алгоритмы, разработанные в рамках теории распознавания образов [12].

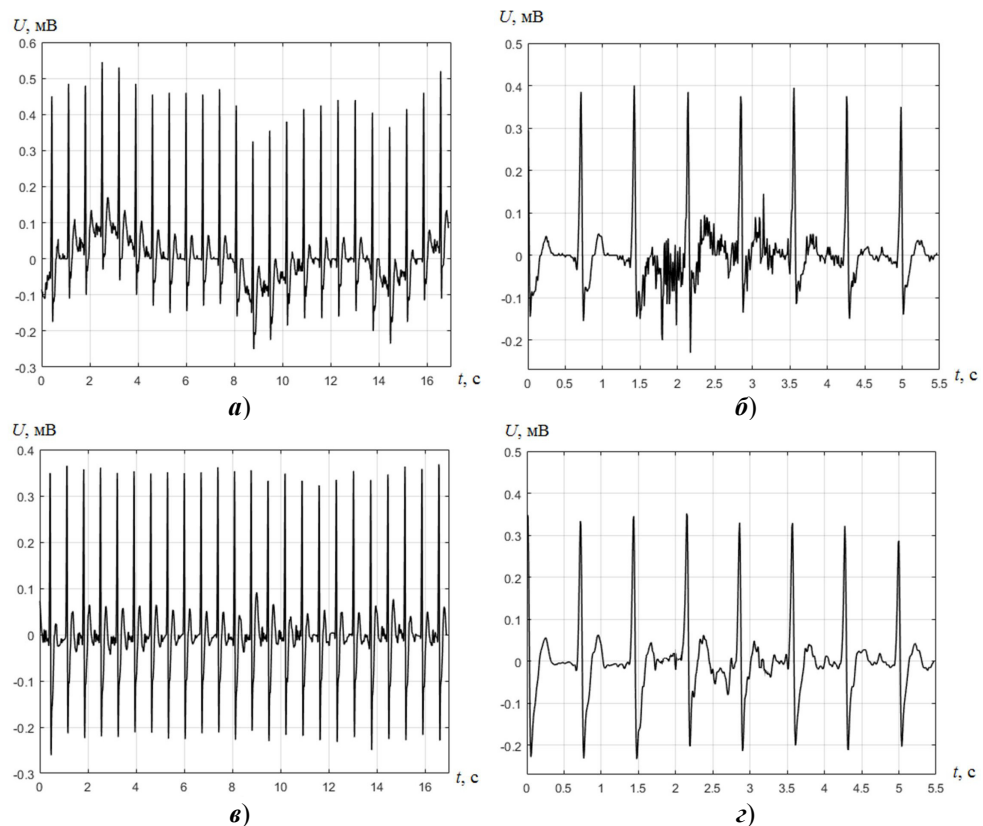


Рис. 3. Пример фильтрации НЧ и ВЧ помех: **а** – ЭКС с НЧ помехой; **б** – ЭКС с НЧ помехой; **в** – ЭКС после фильтрации НЧ помехи; **г** – ЭКС после фильтрации ВЧ помехи

Одной из базовых задач анализа ЭКС является выделение QRS комплекса [13]. При этом автоматизированное выделение признаков, реализуемых специальной нейросетью [14], выглядит наиболее перспективным направлением исследований в этой области. ЭКС относится к потоковым данным, поэтому для обучения нейронной сети и последующего функционирования используется обработка ЭКС с помощью скользящего окна. Хранящиеся в буфере отсчеты подаются на нейронную сеть, на выходе которой формируется решение о наличии или отсутствии QRS комплекса в обрабатываемом окне сигнала [15].

Заключение

Результатом исследования является схема обработки ЭКС, учитывающая особенности процесса мобильного мониторинга и позволяющая повысить эффективность анализа сигнала. Предложенные технические средства для мобильного мониторинга электрокардиосигналов учитывают специфику

длительной регистрации сигнала в условиях свободной двигательной активности. Применение данных средств позволит разрабатывать портативные системы контроля работы сердца на современных мобильных платформах для использования широким кругом пользователей.

Библиографический список

1. **Albert, C.** Triggering of Sudden Death from Cardiac Causes by Vigorous Exertion / C. Albert, M. Mittleman, C. Chae // *New England Journal of Medicine*. – 2000. – № 343. – С. 1355–1361.
2. AliveCor. – URL: <http://https://www.alivecor.com/>
3. Vancive Medical Technologies. – URL: <http://kartendesign.com/work/all-products/metria-wearable-sensor-2/>
4. Mega Electronics. – URL: <http://www.megaemg.com/products/emotion-ecg/>
5. **Borodin, A.** Architectural Approach to the Multisource Health Monitoring Application Design / A. Borodin, Y. Zavyalova, A. Zaharov, I. Yamushev // 17th Conference of Open Innovations Association FRUCT. – Helsinki, Finland : FRUCT Oy, 2015. – С. 16–21.
6. Повышение достоверности оценки состояния сердца в компьютерной диагностической системе «Кардиовид» / С. А. Балахонова, О. Н. Бодин, А. Г. Иванчуков, В. Г. Полосин, А. Г. Убиенных // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2016. – № 2 (38). – С. 61–71.
7. Mobile Heart Monitoring System Prototype Based on the Texas Instruments Hardware: Energy Efficiency and J-point Detection / A. Kuzmin, M. Safronov, O. Bodin, M. Petrovsky, A. Sergeenkov // *International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems*. – 2016. – Vol. 7, № 7. – С. 64–84.
8. **Bao, Y.** Comparing Density Forecast Models / Y. Bao, T. Lee, B. Saltoglu // *Journal of Forecasting*. – 2006. – Vol. 26 (3). – С. 203–225.
9. **Kifer, D.** Detecting Change in Data Streams / D. Kifer, S. Ben-David, J. Gehrke // *Proceedings of the International Conference on Very Large Data Bases*. – Toronto, Canada, 2004. – С. 180–191.
10. **Тычков, А. Ю.** Применение теории Гильберта-Хуанга в задачах обработки кардиографической информации : монография / А. Ю. Тычков, А. В. Кузьмин, П. П. Чураков ; под общ. ред. П. П. Чуракова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – 150 с.
11. *Advanced Methods and Tools for ECG Data Analysis* / G. Clifford, F. Azuaje, P. McSharry (eds.). – Norwood, MA : Artech House, 2006 – 270 с.
12. **Митрохин, М. А.** Метод непараметрического прогнозирования плотности распределения для адаптации решающего правила в байесовском подходе к распознаванию образов / М. А. Митрохин, С. М. Захаров // *Радиотехника*. – 2016. – № 2. – С.13–16.
13. **Pan, J.** A Real-Time QRS Detection Algorithm / J. Pan, W. Tompkins // *IEEE Transactions on biomedical engineering*. – 1985. – Vol. 32, № 3. – С. 230–236.
14. **Schmidhuber, J.** Deep Learning in Neural Networks: An Overview / J. Schmidhuber // *Neural Networks*. – 2015. – № 61. – С. 85–117.
15. **Mitrokhin, M.** Deep learning approach for QRS wave detection in ECG monitoring / M. Mitrokhin, A. Kuzmin, N. Mitrokhina, S. Zakharov, M. Rovnyagin // *IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. Conference proceedings. – Moscow, Russia : IPU, 2017. – Vol. 2. – С. 407–409.

References

1. Albert C., Mittleman M., Chae C. *New England Journal of Medicine*. 2000, no. 343, pp. 1355–1361.

2. *AliveCor*. Available at: <http://www.alivecor.com/>
3. *Vancive Medical Technologies*. Available at: <http://kartendesign.com/work/all-products/metria-wearable-sensor-2/>
4. *Mega Electronics*. Available at: <http://www.megaemg.com/products/emotion-ecg/>
5. Borodin A., Zavyalova Y., Zaharov A., Yamushev I. *7th Conference of Open Innovations Association FRUCT*. Helsinki, Finland: FRUCT Oy, 2015, pp. 16–21.
6. Balakhonova S. A., Bodin O. N., Ivanchukov A. G., Polosin V. G., Ubiennykh A. G. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2016, no. 2 (38), pp. 61–71.
7. Kuzmin A., Safronov M., Bodin O., Petrovsky M., Sergeenkov A. *International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems*. 2016, vol. 7, no. 7, pp. 64–84.
8. Bao Y., Lee T., Saltoglu B. *Journal of Forecasting*. 2006, vol. 26 (3), pp. 203–225.
9. Kifer D., Ben-David S., Gehrke J. *Proceedings of the International Conference on Very Large Data Bases*. Toronto, Canada, 2004, pp. 180–191.
10. Tychkov A. Yu., Kuz'min A. V., Churakov P. P. *Primenenie teorii Gil'berta-Khuanga v zadachakh obrabotki kardiograficheskoy informatsii: monografiya* [The application of the Hilbert–Huang transform in the problems of the cardiographic data processing: monograph]. Penza: Izd-vo PGU, 2015, 150 p.
11. Clifford G., Azuaje F., McSharry P. (eds.) *Advanced Methods and Tools for ECG Data Analysis*. Norwood, MA: Artech House, 2006, 270 p.
12. Mitrokhin M. A., Zakharov S. M. *Radiotekhnika* [Radio engineering]. 2016, no. 2, pp. 13–16.
13. Pan J. A., Tompkins W. *IEEE Transactions on biomedical engineering*. 1985, vol. 32, no. 3, pp. 230–236.
14. Schmidhuber J. *Neural Networks*. 2015, no. 61, pp. 85–117.
15. Mitrokhin M., Kuzmin A., Mitrokhina N., Zakharov S., Rovnyagin M. *IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). Conference proceedings*. Moscow, Russia: IPU, 2017, vol. 2, pp. 407–409.

Волчихин Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор,
президент Пензенского государственного
университета (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: president@pnzgu.ru

Volchikhin Vladimir Ivanovich

Doctor of engineering sciences, professor,
the President of Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Митрохин Максим Александрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра автономных информационных
и управляющих систем, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: mmax83@mail.ru

Mitrokhin Maksim Aleksandrovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of autonomous information
and control systems, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кузьмин Андрей Викторович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-
вычислительных систем, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Kuz'min Andrey Viktorovich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of information
and computing systems, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Сафронов Максим Игоревич

магистрант, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: safronov-maxim@inbox.ru

Safronov Maksim Igorevich

Master's degree student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Бодин Олег Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: bodin-o@inbox.ru

Bodin Oleg Nikolaevich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of information
and measurement technique
and metrology, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Митрохина Наталья Юрьевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра теоретической и прикладной
механики и графики, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: natenal@yandex.ru

Mitrokhina Natal'ya Yur'evna

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of theoretical
and applied mechanics and graphics,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Тычков Александр Юрьевич

кандидат технических наук, заместитель
директора научно-исследовательского
института фундаментальных
и прикладных исследований, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: tychkov-a@mail.ru

Tychkov Aleksandr Yur'evich

Candidate of engineering sciences,
deputy director of scientific research
institute of basic and applied research,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

УДК 004.9

Особенности обработки электрокардиосигналов в системах мобильного мониторинга / В. И. Волчихин, М. А. Митрохин, А. В. Кузьмин, М. И. Сафронов, О. Н. Бодин, Н. Ю. Митрохина, А. Ю. Тычков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 1 (45). – С. 54–63. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-1-5.