

М. Л. ИВАНОВ¹
Д. К. АВДЕЕВА¹
М. М. ЮЖАКОВ¹
С. А. РЫБАЛКА¹
ГО ВЭНЬЦЗЯ¹
И. В. МАКСИМОВ²
М. В. БАЛАХОНОВА³

¹Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
г. Томск

²Национальный исследовательский
медицинский центр
Российской академии наук,
г. Томск

³Сибирский государственный
медицинский университет,
г. Томск

МЕТОДЫ ПРОГРАММНОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННОГО С ПОМОЩЬЮ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА НА НАНОСЕНСОРАХ

В данной статье рассмотрены программные алгоритмы, используемые для детектирования элементов электрокардиосигнала высокого разрешения, зарегистрированного с помощью аппаратно-программного комплекса (АПК) на наносенсорах. Для достижения поставленных целей в исследовании использовались следующие методы: корреляционный анализ, двунаправленная фильтрация, производная первого порядка, корректирующие алгоритмы. Для случаев, когда автоматическое детектирование элементов произведено с ошибкой, создан дополнительный алгоритм ручной корректировки точек.

Ключевые слова: детектирование QRS комплекса, анализ ЭКГ, адаптивная фильтрация.

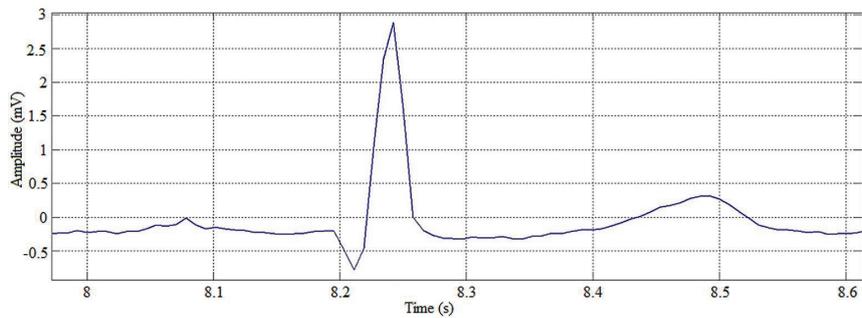
Введение. В медицинской диагностике всегда большое внимание уделяется методам, повышающим точность диагноза и возможности определять болезни на ранних стадиях. Широко применяемая стандартная методика диагностики электрокардиосигнала способна определить наличие многих патологий в процессе работы сердца. Тем не менее данная методика основывается на стандартах, которые были приняты не одно десятилетие назад.

На сегодняшний день в большинстве случаев научные и прикладные исследования направлены на применение различных математических подходов для анализа зарегистрированного сигнала [1–3]. В электрокардиографии для этого используются различные алгоритмы детектирования и устранения шумов. Но следует отметить, что для более

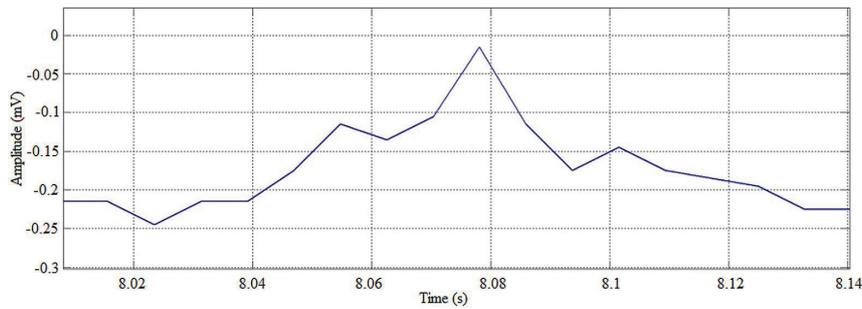
углубленного изучения и наблюдения за работой сердца требуется также и аппаратура с более высоким уровнем отношения сигнал/шум. На сегодняшний день в связи с развитием технических средств и методов обработки диагностические возможности методов расширяются. Новые подходы позволяют расширить диагностические возможности оборудования для формирования более полной картины работы сердца, что приведет к снижению количества смертей, связанных с заболеванием сердечно-сосудистой системы человека.

Одно из актуальных направлений в электрокардиографии является изучение низкоамплитудных потенциалов сердца, регистрируемых неинвазивно с поверхности грудной клетки человека. Используемые в медицинских учреждениях электрокардио-

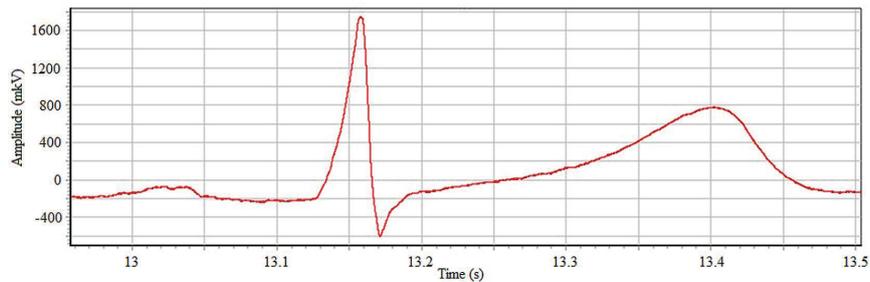
Частота дискретизации регистрируемого сигнала, Гц	16000, 32000, 60 000
Длительность регистрируемого сигнала, с	до 100
Количество каналов	3
Уровень квантования сигнала, нВ	40
Уровень регистрируемых сигналов, мкВ	от 1 до ± 10000



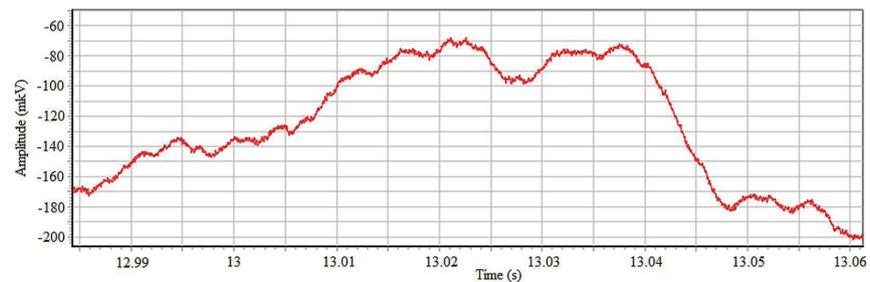
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Пример записи из открытой базы данных ЭКГ и записи АПК на наносенсорах: а) фрагмент кардиоцикла из записи 16786 в базе MIT-BIH Normal Sinus Rhythm Database; б) зубец Р из кардиоцикла на рис. 1а; в) фрагмент кардиоцикла из записи АПК на наносенсорах; г) зубец Р из кардиоцикла на рис. 1в

графы не дают возможности производить анализ тонкой структуры ЭКГ сигнала без его усреднения, так как уровень шума в таких приборах не позволяет выделить низкоамплитудные потенциалы сердца в одиночных кардиоциклах [4].

Метод. В рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020» на базе НПЛ «Медицинская инженерия» Томского политехнического университета разработан аппаратно-программный комплекс (АПК) на наносенсорах для регистрации сигналов высокого разрешения [5]. Технические характеристики прибора приведены в табл. 1. Благодаря техническим характеристикам АПК на наносенсорах появилась возможность снизить уровень шумов в сигнале настолько, что анализ микропотенциалов сердца в кардосигнале стал возможен без использования усреднения. Специальное программное обеспечение позволяет устранить сосредоточенные помехи с сохранением спектра сигнала и устранить собственный шум АПК. Высокое разрешение созданной аппаратуры достигнуто благодаря разработке малозумящих, помехоустойчивых, неполяризующихся наносенсоров, уровень шума которых не превышает ± 200 нВ в полосе частот от 0 до 10000 Гц [6].

Сигнал с более высоким разрешением позволяет более точно определять информативно-значимые участки в кардиоциклах, которыми могут являться начало и конец зубцов, наклоны, амплитудные значения. Для определения этих участков требуется разработка новых либо модификация старых методов анализа и обработки сигнала. В более современных работах по детектированию элементов ЭКГ сигнала [1, 7–13] описываются подходы с использованием производных, цифровых фильтров, вейвлет-преобразования, нейронных сетей и гибридного метода. В этих методах увеличивается количество этапов обработки сигнала в процессе детектирования элементов. Такой прием повышает точность и чувствительность алгоритмов детектирования.

Авторами в [14] упоминается о двух базах кардосигналов с открытым доступом к кардиологическим записям: MIT-BIH и АНА. Данные базы могут быть использованы как для целей обучения, так и для апробации новых методов обработки ЭКГ сигналов. Нами с помощью прикладной программы в среде MATLAB были построены записи для сравнения качества сигнала из открытой базы данных (MIT-BIH Normal Sinus Rhythm Database, record 16786) и сигнала, зарегистрированного с помощью АПК на наносенсорах (рис. 1). Сравнение записей позволяет сделать вывод, что АПК на наносенсорах качественнее описывает формы зубцов.

Разработанный АПК на наносенсорах был успешно проверен на добровольцах. Предварительные исследования проводились на пациентах в клинике Томского НИИ кардиологии. Каждый доброволец подписывал форму информированного согласия на проведение клинических испытаний (клинические испытания были одобрены местным этическим комитетом по биомедицинской этике, Научно-исследовательский институт кардиологии, протокол № 147 от 28 июня 2016 года). Запись ЭКГ по трем отведениям по Холтеру проводилась с грудной клетки в покое.

Для исследования кардосигнала высокого разрешения, зарегистрированного на АПК на наносенсорах, была разработана программа в среде объек-

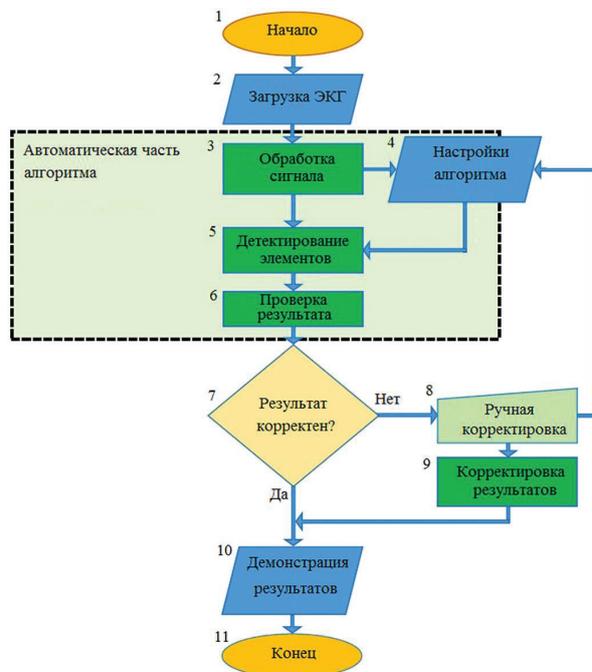


Рис. 2. Общая схема алгоритма программы

тно-ориентированного программирования DELPHI XE 5. Общий алгоритм работы программы представлен на рис. 2.

В большинстве случаев перед исследованием сигнала производится его предобработка. В зависимости от поставленных целей исследования в этот процесс может входить: уменьшение шумов, адаптивная фильтрация, выравнивание сигнала, децимация и др. Обычно это производится для выделения или усиления полезной составляющей сигнала [15–17]. Как отмечается авторами, одним из основных подходов при разработке алгоритмов детектирования элементов заключается в создании специальной структуры представления информации из зарегистрированного сигнала различными методами. Данная информационная структура используется как одно из условий в алгоритмах детектирования элементов. Такой подход удобен, так как является промежуточным этапом, в котором доступна возможность изменения или добавления методов обработки сигнала.

Одной из первых задач, решаемых в программе, является определение длительности кардиоцикла (R-R). Этот параметр используется в виде переменной для поиска элементов в кардиоцикле. Из-за различных форм и длительностей элементов сигнала в кардиоциклах у пациентов, потребовался алгоритм с возможностью определения центра комплекса QRS, его направления и возможностью исключения ошибочного принятия экстрасистолы за комплекс QRS.

Алгоритм основан на поиске точек, которые определяют интервал комплекса QRS. Для определения их местоположения используется производная первого порядка, поэтому для исключения ложных экстремумов используется фильтрация. Кроме пиков Q, R, S зубцов, детектируются точки с максимальным ростом и снижением сигнала в пределах комплекса QRS (рис. 3).

В программе используются несколько моделей цифровых фильтров с целью детектирования эле-

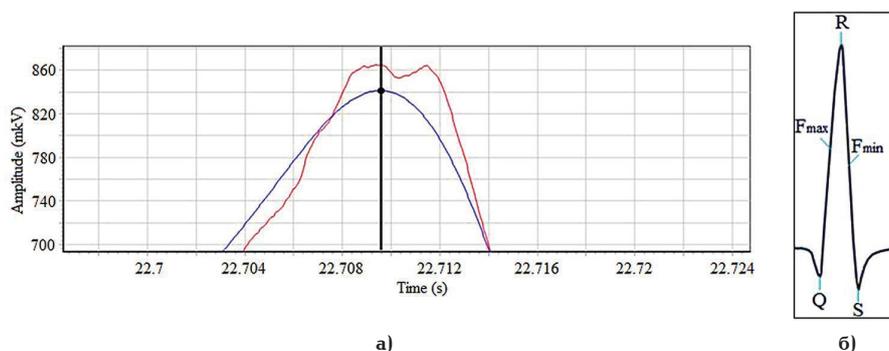


Рис. 3. Детектирование комплекса QRS

ментов с различными амплитудно-временными параметрами. Так как известны ориентировочные параметры длительности и амплитуды зубцов в сигнале, то подбирается частота среза фильтра для каждого зубца в отдельности. Например, комплекс QRS ориентировочно имеет длительность от 50 мс до 100 мс и амплитуду от 1 мВ до 4 мВ, для обработки этого комплекса был разработан фильтр нижних частот с частотой среза 75 Гц, для зубца Р с ориентировочной длительностью 100 мс и амплитудой от 50 мкВ до 200 мкВ разработан фильтр нижних частот с частотой среза 50 Гц. Все фильтры были спроектированы в среде MATLAB и перенесены в программу обработки с помощью расчетных коэффициентов и формулы рекурсивного цифрового фильтра четвертого порядка, описываемого разностным уравнением (1):

$$\begin{aligned}
 f_2[n] = & a_0 f_1[n] + a_1 f_1[n-1] + a_2 f_1[n-2] + \\
 & + a_3 f_1[n-3] + a_4 f_1[n-4] + b_1 f_2[n-1] + \\
 & + b_2 f_2[n-2] + b_3 f_2[n-3] + b_4 f_2[n-4].
 \end{aligned} \quad (1)$$

Так как при фильтрации происходит временное смещение элементов сигнала, то для восстановления положения используется двунаправленная фильтрация. На рис. 3а показано определение центра R зубца с помощью производной первого порядка и двунаправленной фильтрации. В сигнале высокого разрешения у пациентов встречается плохо выраженный пик R либо он может быть раздвоенный, эта проблема решена с помощью двунаправленной фильтрации.

Кроме центра R, определяются пики Q, S зубцов, максимальное (Fmax) и минимальное (Fmin) значение производной в интервале QRS (рис. 3б), которые используются в поиске следующих QRS комплексов по алгоритму: если в окне поиска появляется значение более половины модуля значения Fmax или Fmin, то запускается детектирование точек комплекса QRS. Для подтверждения, что найден QRS комплекс выполняется корреляция по центральной точке R зубца из предыдущего кардиоцикла.

Результатом выполнения алгоритмом детектирования в программе является массив, в котором записаны координаты точек. В каждом кардиоцикле определяется местоположение 13 точек (рис. 4).

Если детектирование пиков или центров зубцов удастся определить с высокой точностью, то определение начала и конца зубцов является более сложной задачей.

Используя морфологию кардиосигнала, в алгоритме заложен последовательный порядок определе-

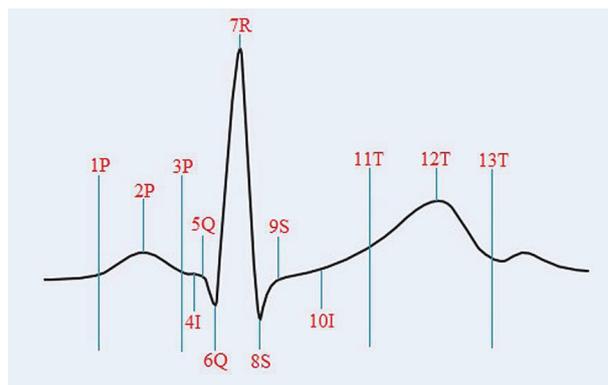


Рис. 4. Детектируемые точки в кардиоцикле

ния зубцов по степени отдаленности расположения от зубца R. Кроме этого, учитывая ориентировочные временные параметры элементов, например, на зубец Р приблизительно приходится 9 % длительности кардиоцикла, а на зубец Т 20 %, поисковое окно алгоритма отслеживает значение сигнала в предполагаемой области, в которой должен находиться детектируемый зубец.

Результаты. У пациентов с различными заболеваниями могут быть зарегистрированы кардиосигналы, форма которых значительно отличается от стандартной, поэтому алгоритмы детектирования не могут определить точки корректно. Для решения этой задачи создан алгоритм, который осуществляет поиск некорректных точек. Когда положение точки определено с большими отклонениями от среднего значения либо от статистических данных, выводится информация с целью ручной корректировки местоположения точки.

Алгоритм автоматического детектирования точек ориентирован на форму ЭКГ в норме, после его выполнения запускается проверка найденных точек двумя способами через длину интервалов между найденной точкой и центра зубца R. В первом способе определяется среднее значение и сравнивается с одиночными значениями в каждом кардиоцикле и, если различие превышает 30%, оповещается о наличии некорректности. Во втором способе идет сравнение со статистикой (средние значения по ЭКГ пациентов без искаженных форм сигнала), и если различие превышает 60%, то оповещается о наличии некорректности. Кроме этого, в программе доступна функция перехода в кардиоцикл с отрезком, у которого определено максимальное отклонение в сигнале для ручного корректирования положения точки. Ре-

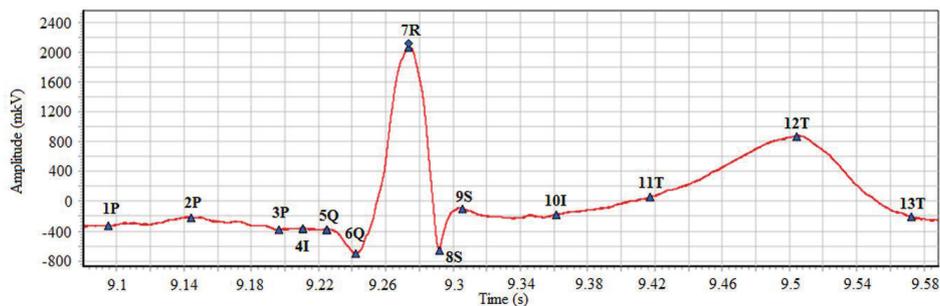


Рис. 5. Корректное автоматическое детектирование элементов в кардиоцикле

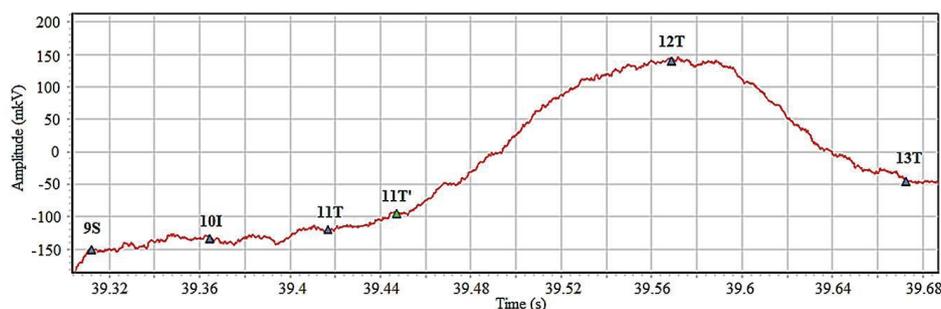


Рис. 6. Ручная корректировка детектирования элементов в кардиоцикле

Таблица 2

Чувствительность и погрешность алгоритма детектирования

№ точки	Чувствительность (Se), %	Погрешность (Δ), мсек
1	99,7	8,7
2	99,9	2,6
3	99,6	10,2
5	99,3	7,1
6	99,5	4,5
7	100	0,1
8	99,8	5,5
9	99,6	9,6
11	99,3	27
12	99,9	15,2
13	99,4	23

зультат детектирования алгоритмом представлен на рис. 5.

Если в процессе детектирования появились некорректные или с погрешностью определенные точки, то в ручном режиме можно исправить их местоположение (рис. 6). На этом рисунке начало зубца Т было подкорректировано точкой, находящейся правее. Кроме ручной корректировки точек, можно изменить настройки алгоритмов детектирования. Для изменений доступны параметры поиска

QRS комплекса, уточняющих алгоритмов и критерий корректности длины интервалов.

В табл. 2 приведена оценка результатов детектирования элементов кардиосигнала при анализе более 600 кардиоциклов у различных пациентов (чувствительность (Se), абсолютная погрешность по времени (Δ). Чувствительность определяется как отношение истинно положительных (TP) к сумме истинно положительных (TP) и ложно негативных (FN) срабатываний детектирующего алгоритма.

Важно отметить, что АПК на наносенсорах регистрирует кардиосигналы высокого разрешения, что обеспечило повышенную точность определения границ и форм зубцов и проведение оценки низкочастотных флуктуаций сигнала без усреднения.

Наличие отклонений в работе сердца может очень сильно отразиться на форме сигнала что даже используя морфологическую информацию о формах электрокардиограмм в норме, визуально не удастся точно определить, где заканчивается область того или иного зубца.

Выводы. В статье описаны методы и подходы в детектировании, которые оказались более устойчивы к анализу кардиосигнала с высоким разрешением с различными формами зубцов. Среди методов и подходов в обработке сигнала используются следующие: фильтрация, производная первого порядка, модуль значения сигнала, морфологические свойства сигнала и временные области поиска зубцов относительно комплекса QRS. Использование этих методов для сигнала АПК на наносенсорах позволяет определить точнее местоположение информативных точек в сигнале, что положительно отразится на процесс постановки диагноза.

Исследование кардиосигнала с более точным описанием работы сердца расширяет область поиска признаков, прогнозирующих наличие болезней, поэтому применение как новых методов обработки сигнала, так и повышение разрешения регистрируемого сигнала позволит повысить диагностические возможности оборудования.

Благодарности

Исследования были проведены при поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020» (Соглашение № 14.578.21.0032 от 05.06.2014, уникальный идентификатор контракта: RFMEF157814X0032).

Библиографический список

1. Kohler B.-U., Hennig C., Orglmeister R. The principles of software QRS detection // *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*. 2002. Vol. 21 (1). P. 42–57. DOI: 10.1109/51.993193.
2. Sehamby R., Singh B. Noise Cancellation using Adaptive Filtering in ECG Signals: Application to Biotelemetry // *International Journal of Bio-Science and Bio-Technology*. 2016. Vol. 8 (2). P. 237–244. DOI: 10.14257/ijbsbt.2016.8.2.22.
3. Laciari E., Janj R., Brooks D. H. Improved alignment method for noisy high-resolution ECG and Holter records using multiscale cross-correlation // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2003. Vol. 50 (3). P. 344–353. DOI: 10.1109/TBME.2003.808821.
4. 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 (4). P. 195. DOI: 10.1515/ejnm-2016-0019.
5. Avdeeva D. K., Ivanov M. L., Yuzhakov M. M., Turushev N. V., Kodermatov R. V., 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.
6. Simson M. B. Use of signals in the terminal QRS complex to identify patients with ventricular tachycardia after myocardial infarction // *Circulation*. 1981. Vol. 64 (2). P. 235–242. DOI: 10.1161/01.CIR.64.2.235.
7. Pandit D., Zhang L., Liu C. [et al.]. A lightweight QRS detector for single lead ECG signals using a max-min difference algorithm // *Comput Methods Programs Biomed.* 2017. Vol. 144. P. 61–75. DOI: 10.1016/j.cmpb.2017.02.028.
8. Shweta Jain, Ahirwal M. K., Kumar Anil [et al.]. Singh G.K. QRS detection using adaptive filters: A comparative study // *ISA Transactions*. 2017. Vol. 66. P. 362–375. DOI: 10.1016/j.isatra.2016.09.023.
9. Castells-Rufas D., Carrabina J. Simple real-time QRS detector with the MaMeMi filter // *Biomedical Signal Processing and Control*. 2015. Vol. 21. P. 137–145. DOI: 10.1016/j.bspc.2015.06.001.
10. Parihar N., Chouhan V. S. Detection of P and T wave using Bayesian Regularisation // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2012. Vol. 3 (12). 4 p.
11. Mehta S. S., Lingayat N. S. Detection of P and T-waves in Electrocardiogram // *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*. 2008. 6 p.
12. SASIKALA P., WahidaBanu R. S. D. Extraction of P wave and T wave in Electrocardiogram using Wavelet Transform // *International Journal of Computer Science and Information Technologies*. 2011. Vol. 2. P. 489–493.
13. Wojdel A., Ribas Ripoll V. J., Teixidro-Roman M. [et al.]. Robust detection of ECG waves // *Computing in Cardiology*. 2015. Vol. 42. P. 569–572. DOI: 10.1109/CIC.2015.7410974.
14. Blvarez R. A., Míndez Penñn A. J., Vila Sobrino X. A. A Comparison of Three QRS Detection Algorithms Over a Public Database // *Procedia Technology*. 2013. Vol. 9. P. 1159–1165. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.129.
15. Zhu J., Zhang X., Wang Z. [et al.]. Preprocessing and analysis of the ECG signals // *Seventh International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Sensors and Instruments, Computer Simulation, and Artificial Intelligence*. 2008. Vol. 7127. 5 p. DOI: 10.1117/12.806746.

16. Sabarimalai Manikandan M., Soman K. P. A novel method for detecting R-peaks in electrocardiogram (ECG) signal // *Biomedical Signal Processing and Control*. 2012. Vol. 7 (2). P. 118–128. DOI: 10.1016/j.bspc.2011.03.004.

17. Elgendi M. Fast QRS detection with an optimized knowledge-based method: evaluation on 11 standard ECG databases // *PLOS ONE*. 2013. Vol. 8. e73557. DOI: 10.1371/journal.pone.0073557.

ИВАНОВ Максим Леонидович, кандидат технических наук, младший научный сотрудник НПЛ «Медицинская инженерия» Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ), г. Томск.

SPIN-код: 5036-2071

ORCID: 0000-0002-3039-2805

ResearcherID: G-8445-2013

АВДЕЕВА Диана Константиновна, доктор технических наук, профессор, заведующая НПЛ «Медицинская инженерия» НИ ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 3497-5326

ORCID: 0000-0002-4696-3756

ResearcherID: J-6958-2013

ЮЖАКОВ Михаил Михайлович, кандидат технических наук, инженер НПЛ «Медицинская инженерия» НИ ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 7316-0080

ORCID: 0000-0001-9642-602X

ResearcherID: A-5048-2014

РЫБАЛКА Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент отделения математики и информатики (ШБИП) НИ ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 1436-3586

ORCID: 0000-0003-0222-2371

ResearcherID: A-3993-2014

ГО Вэньцзя, аспирант НПЛ «Медицинская инженерия» НИ ТПУ, г. Томск.

ORCID: 0000-0003-4321-1038

ResearcherID: AАН-6933-2019

МАКСИМОВ Иван Вадимович, доктор медицинских наук, профессор, ведущий научный сотрудник отделения неотложной кардиологии НИИ кардиологии Национального исследовательского медицинского центра РАН, г. Томск.

SPIN-код: 2359-0745

ORCID: 0000-0003-0367-1654

ResearcherID: A-5552-2014

AuthorID (SCOPUS): 7005587742

БАЛАХОНОВА Марина Владимировна, кандидат медицинских наук, ассистент кафедры кардиологии Сибирского государственного медицинского университета, г. Томск.

ORCID: 0000-0001-5906-607X

ResearcherID: P-6700-2017

Адрес для переписки: diana.avdeeva@mail.ru

Для цитирования

Иванов М. Л., Авдеева Д. К., Южаков М. М., Рыбалка С. А., Го Вэньцзя, Максимов И. В., Балахонова М. В. Методы программного анализа электрокардиосигнала высокого разрешения, зарегистрированного с помощью аппаратно-программного комплекса на наносенсорах // Омский научный вестник. 2020. № 4 (172). С. 74–79. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-172-74-79.

Статья поступила в редакцию 17.06.2020 г.

© М. Л. Иванов, Д. К. Авдеева, М. М. Южаков, С. А. Рыбалка, Го Вэньцзя, И. В. Максимов, М. В. Балахонова