

Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий

УДК 615.47

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-2-68-77>

Разработка алгоритма кластеризации кардиокомплексов с пострекоррекцией для задач длительного мониторингирования электрокардиосигнала

И. А. Кондратьева¹✉, А. С. Красичков^{1,2}, О. А. Станчева^{2,3},
Э. Мбазумутима¹, Ф. Шикама¹, Е. М. Нифонтов²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи Министерства здравоохранения РФ, Санкт-Петербург, Россия

✉ irikondr1721@gmail.com

Аннотация

Введение. Наиболее распространенным методом диагностики сердечно-сосудистых заболеваний является длительное мониторингирование электрокардиосигнала (ЭКС). Для облегчения анализа полученных мониторограмм врачам-кардиологам необходимы специальные алгоритмы и программные средства автоматизированной обработки ЭКС. Одним из таких средств является алгоритм автоматизированной обработки ЭКС, выполняющий кластеризацию кардиокомплексов (КК), разделяя ЭКС на группы максимально близких по форме КК. Дальнейшему анализу подвергаются только эталонные КК, полученные статистическим усреднением КК в каждой группе.

Цель работы. Разработка алгоритма автоматизированной кластеризации КК ЭКС, разделяющего электрокардиосигнал на группы максимально близких по форме КК.

Материалы и методы. Экспериментальная апробация алгоритма и программного модуля проводилась на базе обезличенных суточных записей ЭКС пациентов Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. акад. И. П. Павлова Минздрава России. Программный модуль был реализован в среде MatLab.

Результаты. Разработан алгоритм сортировки КК с пострекоррекцией для длительного мониторингирования ЭКС; представлен программный модуль, реализованный на базе разработанного алгоритма. Рассмотрено влияние ошибок синхронизации КК при их накоплении на форму усредняемого КК. Классическое решение задачи деконволюции приводит к значительным ошибкам при нахождении оценки "истинной" формы КК. На основании аналитических расчетов получены выражения для коррекции накапливаемого КК. Показано, что в результате коррекции можно нивелировать ошибки накопления, связанные с рассинхронизацией.

Заключение. Наличие небольшого количества эталонных КК, полученных в результате обработки ЭКС с помощью предложенного алгоритма, позволяет врачу-исследователю значительно сократить время, затрачиваемое на анализ ЭКС, и является основой исследования динамических изменений формы и иных параметров КК как для конкретного пациента, так и для их группы. Полученные результаты позволяют создать основу для решения задач, направленных на исследование "тонкой" структуры ЭКС.

Ключевые слова: электрокардиосигнал, частота сердечных сокращений (ЧСС), сортировка кардиокомплексов, ошибка синхронизации, синхронное накопление, коррекция формы сигнала

Для цитирования: Разработка кластеризации кардиокомплексов с пострекоррекцией для задач длительного мониторингирования электрокардиосигнала / И. А. Кондратьева, А. С. Красичков, О. А. Станчева, Э. Мбазумутима, Ф. Шикама, Е. М. Нифонтов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 2. С. 68–77. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-2-68-77

Благодарности. Выражаем благодарность Первому Санкт-Петербургскому государственному медицинскому университету имени академика И. П. Павлова за предоставление базы данных длительных записей ЭКГ пациентов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания "Совершенствование методов, направленных на ограничение ишемического повреждения миокарда и головного мозга и выявление механизмов эффективного функционального восстановления", гос. рег. № AAAA-A18-118070690075-6.

Статья поступила в редакцию 05.11.2020; принята к публикации после рецензирования 14.12.2020; опубликована онлайн 29.04.2021

© Кондратьева И. А., Красичков А. С., Станчева О. А., Мбазумутима Э., Шикама Ф., Нифонтов Е. М., 2021



Medical Devices and Devices for Control of the Environment,
Substances, Materials and Products

Original article

Development of an Algorithm for Clustering Cardiac ECG Signals with Post-Correction for Long-Term ECG Monitoring

Irina A. Kondratyeva¹ ✉, Alexander S. Krasichkov^{1,2}, Olga A. Stancheva^{2,3},
Eliachim Mbazumutima¹, Fabian Shikema¹, Evgeny M. Nifontov²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, St Petersburg, Russia

³ Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech, St Petersburg, Russia

✉ irikondr1721@gmail.com

Abstract

Introduction. The most common method for diagnosing cardiovascular diseases is the method of ECG monitoring. In order to facilitate the analysis of the obtained monitorograms, special software solutions for automated ECG processing are required. One possible approach is the use of algorithms for automated ECG processing. Such algorithms perform clustering of cardiac signals by dividing the ECG into complexes of similar cardiac signals. The most representative complexes obtained by statistical averaging are subject to further analysis.

Aim. Development of an algorithm for automated ECG processing, which performs clustering of cardiac signals by dividing the ECG into complexes of similar cardiac signals.

Materials and methods. Experimental testing of the developed software was carried out using patient records provided by the Pavlov First State Medical University of St Petersburg. The software module was implemented in the MatLab environment.

Results. An algorithm for clustering cardiac signals with post-correction for the tasks of long-term ECG monitoring and a software module on its basis were proposed.

Conclusion. The presence of a small number of reference cardiac signal complexes, obtained through ECG processing using the proposed algorithm, allows physicians to optimize the process of ECG analysis. The as-obtained information serves as a basis for assessing dynamic changes in the shape and other parameters of cardiac signals for both a particular patient and groups of patients. The paper considers the effect of synchronization errors of clustered cardiac signals on the shape of the averaged cardiac complex. The classical solution to the deconvolution problem leads to significant errors in finding an estimate of the true form of a cardiac signal complex. On the basis of analytical calculations, expressions were obtained for the correction of clustered cardiac signals. Such correction was shown to reduce clusterization errors associated with desynchronization, which creates a basis for investigating the fine structure of ECG signals.

Keywords: electrocardiogram, heart rate (HR), ECG clustering algorithm, sync error, synchronous accumulation, signal shape correction

For citation: Kondratyeva I. A., Krasichkov A. S., Stancheva O. A., Mbazumutima E., Shikema F., Nifontov E. M. Development of an Algorithm for Clustering Cardiac ECG Signals with Post-Correction for Long-Term ECG Monitoring. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 2, pp. 68–77. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-2-68-77

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the Pavlov First State Medical University of St Petersburg for providing a database of long-term ECG records of patients.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of financing. The work was carried out within the framework of the state task "Improvement of methods aimed at limiting ischemic damage to the myocardium and brain and identifying mechanisms for effective functional recovery", state registration no. AAAA18-118070690075-6.

Submitted 05.11.2020; accepted 14.12.2020; published online 29.04.2021

Введение. Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) являются одной из основных причин смертности во всем мире. Поэтому достоверная и своевременная диагностика сердеч-

ных патологий весьма важна. Наиболее распространенный метод диагностики ССЗ – длительное мониторирование электрокардиосигнала (ЭКС).

В процессе регистрации ЭКС возникают помехи различного происхождения, затрудняющие его анализ. Для облегчения анализа полученных мониторинговых программ врачам-кардиологам необходимы специальные алгоритмы и программные средства автоматизированной обработки ЭКС. Это особенно важно для задач длительного мониторинга, когда анализ записей ЭКС врачом требует значительного времени.

Одно из решений указанной проблемы состоит в использовании алгоритма автоматизированной обработки ЭКС, который выполняет кластеризацию кардиокомплексов (КК), разделяя ЭКС на группы близких по форме КК. Дальнейшему анализу подвергаются только эталонные КК, полученные путем статистического усреднения КК в каждой группе [1].

В настоящей статье предложен алгоритм сортировки КК (рис. 1), интегрированный в программный модуль (ПМ) в среде разработки MatLab, предназначенный для получения эталонных КК и исследования их статистических характеристик.

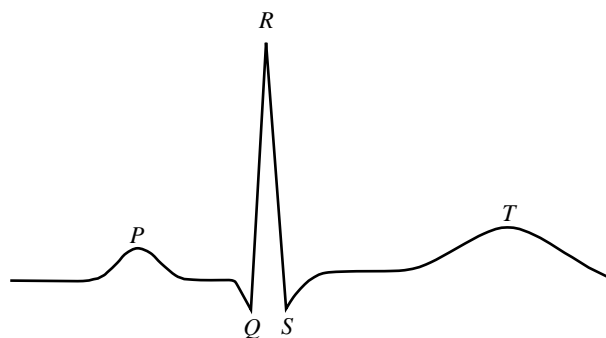


Рис. 1. Кардиокомплекс

Fig. 1. Cardio complex

Материалы и методы. На рис. 2 представлена структурная схема предложенного алгоритма, содержащая модули предварительной обработки ЭКС I и кластеризации КК II. В модуле I устраняется дрейф изоэлектрической линии ЭКС (рис. 3, а) при помощи медианного фильтра (рис. 2, 1, рис. 3, б) [2–4], после чего КК обнаруживаются с помощью алгоритма Пана–Томпкинса (рис. 2, 2, рис. 3, в) [5–7]. В модуле II определяется частота сердечных сокращений (ЧСС) (рис. 2, 3). На завершающих этапах КК сортируются по этому параметру (рис. 2, 4), определяются взаимные коэффициенты их корреляции (рис. 2, 5) и среди КК, обладающих значительной корреляцией, выполняется усреднение для определения эталонных КК в каждом кластере (рис. 2, б).

Для оценки повторяющихся сигналов с низкой амплитудой в условиях сложной помеховой

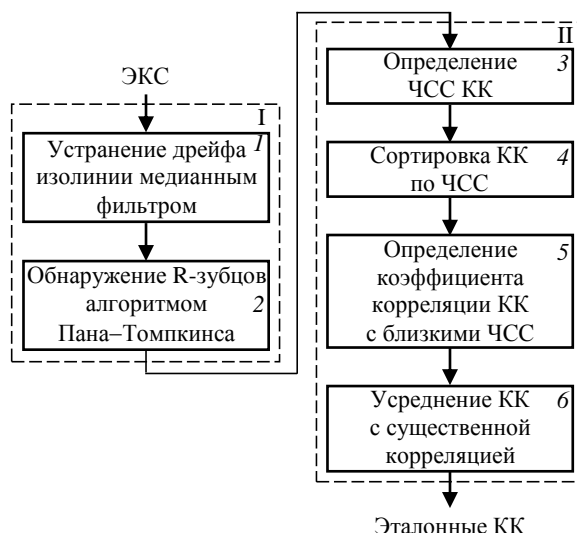


Рис. 2. Структурная схема алгоритма сортировки КК

Fig. 2. Block diagram of the sorting algorithm for cardiac complexes

обстановки существует эффективный подход, основанный на методе синхронного накопления, который лежит в основе решения задачи сортировки КК [8]. Его реализация требует выделения опорных точек. В рассматриваемой задаче в качестве опорной точки целесообразно использовать положение максимума R-зубца (рис. 3, в) [9], [10].

Сортировка КК осуществляется по двум параметрам: частоте сердечных сокращений (heart rate – HR) и выборочному значению коэффициента корреляции. ЧСС j -го КК рассчитывается как $HR_j = \bar{T}_{RR_j}^{-1}$, где

$$\bar{T}_{RR_j} = \frac{1}{M} \sum_{i=-M+1}^0 T_{RR_{j+i}}$$

– длительность RR-интервала, усредненная за M реализаций [11].

Границы КК вычисляются с помощью эмпирических выражений

$$a = 0.2\sqrt{\bar{T}_{RR_j}}; \quad b = 0.4\sqrt{\bar{T}_{RR_j}},$$

где a, b – левая и правая границы КК (рис. 3, в).

В результате на первом этапе алгоритма сортировки формируются группы КК, имеющие близкие значения ЧСС. На практике в группы объединялись КК, имеющие интервалы ЧСС в пределах 10 ударов в минуту.

На втором этапе в каждой группе с близкой ЧСС между всеми парами КК определялся выборочный коэффициент корреляции:

$$r(m, n) = \frac{\sum_{i=1}^N [S_m(i) - \bar{S}_m][S_n(i) - \bar{S}_n]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [S_m(i) - \bar{S}_m]^2 \sum_{i=1}^N [S_n(i) - \bar{S}_n]^2}},$$

где N – число отсчетов в КК; \bar{S}_m , \bar{S}_n – выборочные средние значения m -го и n -го КК соответственно.

Взаимно коррелированными считаются КК, выборочный коэффициент корреляции которых превосходит заданный порог.

КК, имеющий наибольшее количество попарно коррелированных с ним КК, считается эталонным. Он усредняется с попарно коррелированными.

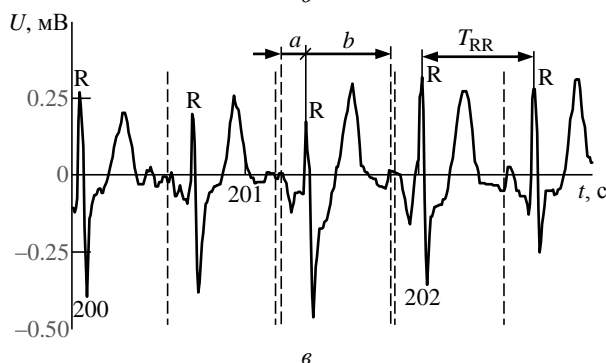
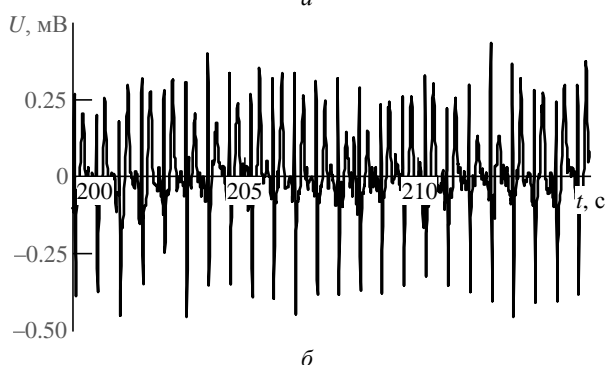
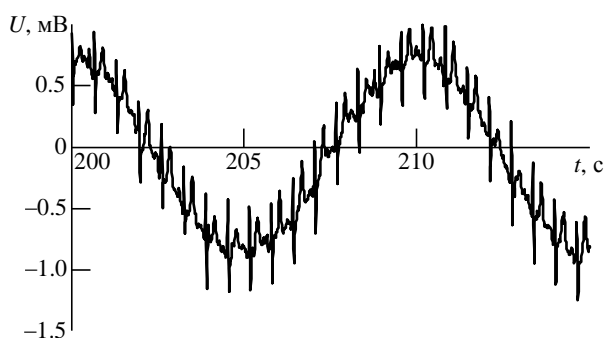


Рис. 3. Предварительная обработка ЭКС: а – исходный ЭКС; б – ЭКС после устранения дрейфа изоэлектрической линии; в – определение параметров КК

Fig. 3. Preliminary processing of the electro cardio signal: а – original electro cardio signal; б – electro cardio signal after elimination of the isoelectric line drift; в – determination of cardio complex parameters

Полученный в результате усреднения КК замещает эталонный. Далее алгоритм повторяется для оставшихся КК, не вошедших в усреднение, до тех пор, пока не будут кластеризованы все КК.

В результате применения рассмотренного алгоритма определяется набор эталонных (усредненных) КК для каждого диапазона ЧСС с информацией о количестве КК, использованных при формировании каждого эталонного КК.

Рассмотрим влияние на форму эталонного КК ошибок синхронизации при накоплении КК. Отклонение оценки точки синхронизации от истинного значения положения R-зубца на величину τ (рис. 4, а) обусловлено присутствием помех и характеризуется плотностью вероятности (ПВ) $W_R(\tau)$.

Допустим, что КК, формирующие эталонный сигнал, являются практически идентичными: $S_m(t) = S(t)$. Тогда усредненный ЭКС для такой группы будет иметь вид

$$S_{\Sigma}(t) = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} S(t + \tau_j),$$

где τ_j – ошибка определения положения j -го КК.

Полагая, что ПВ ошибки фиксации положения R-зубца для j -го КК $W_R(\tau)$ не зависит от j , можно показать, что среднее значение функции $S_{\Sigma}(t)$

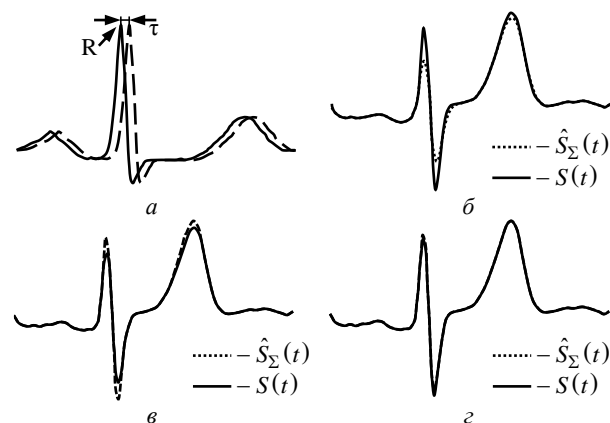


Рис. 4. Влияние ошибок синхронизации на форму эталонного КК: а – отклонение оценки точки синхронизации; б – ошибка усреднения, вызванная неточной синхронизацией; в – результат коррекции формы накопленного сигнала согласно (2); г – результат коррекции согласно (3)

Fig. 4. The influence of synchronization errors on the shape of the reference cardio complex: а – deviation of the estimate synchronization point; б – averaging error caused by inaccurate synchronization; в – the result of correcting the shape of the accumulated signal according to (2); г – the result of the correction according to (3)

представляет собой результат свертки сигнала $S(t)$ с функцией $W_R(\tau)$:

$$m\{S_\Sigma(t)\} = S(t) * W(\tau), \quad (1)$$

где $m\{\cdot\}$ – результат статистического усреднения; $*$ – оператор свертки [8], [12], [13].

На рис. 4, б представлены усредненный КК с искажениями, вызванными ошибкой синхронизации, полученный согласно (1) (пунктирная линия), и искомый сигнал (сплошная линия). Результат получен моделированием при нормальном законе флуктуации положения R-зубцов. На рисунке прослеживаются значительные искажения усредненного КК, негативно влияющие на качество диагностики. Поэтому необходимо осуществлять коррекцию накапливаемого КК.

"Истинную" оценку формы кардиокомплекса можно найти, решив задачу обратной свертки (деконволюции), что следует из (1). Однако при решении задачи деконволюции исследователь располагает только оценкой $\hat{S}_\Sigma(t)$ функции $m\{S_\Sigma(t)\}$, полученной при усреднении реализаций КК:

$$\hat{S}_\Sigma(t) = m\{S_\Sigma(t)\} + \varepsilon = S(t) * W(\tau) + \varepsilon,$$

где ε – ошибка приближения.

Наличие даже малой ошибки ε может привести к значительным отклонениям восстанавливаемого сигнала $\hat{S}(t)$ (полученным в результате обратной свертки) от его "истинной" формы $S(t)$. Поэтому использование рассмотренного метода усреднения на практике проблематично.

Решение задачи в дискретном виде предложено в [8], где показано, что оценка $\hat{S}(t)$ может быть получена с использованием дополнительной информации о структурных свойствах ЭКС, а именно при аппроксимации небольших фрагментов КК в окрестности точки i полиномами второго порядка, содержащего j точек:

$$S(i+j) = C_{2i}j^2 + C_{1i}j + C_{0i}, \quad j \in [-n-1, n+1],$$

где C_{2i} , C_{1i} , C_{0i} – коэффициенты полинома.

В этом случае (1) приобретает вид

$$m\{S_\Sigma(t)\} = \sum_{j=-n}^n a_j S(i+j),$$

где a_j – коэффициенты разложения ПВ дискретной случайной величины:

$$W(\tau) = \sum_{j=-n}^n a_j \delta(\tau - j).$$

Результаты. Показано [7], что в результате анализа длительных записей ЭКС при формировании эталонного КК происходит усреднение большого количества КК, что позволяет в первом приближении считать $m\{S_\Sigma(i)\} \approx \hat{S}_\Sigma(i)$. Тогда искомая оценка составляет

$$\hat{S}(i) = (1 + \alpha) \hat{S}_\Sigma(i) - \frac{1}{2} \alpha [\hat{S}_\Sigma(i+1) + \hat{S}_\Sigma(i-1)], \quad (2)$$

где $\alpha = \sum_{j=-n}^n j^2 a_j$, что является коррекцией оценки $\hat{S}_\Sigma(t)$.

Результат коррекции в соответствии с (2) представлен на рис. 4, в. Как следует из рисунка, этот результат, хотя и приближается к "истинной" форме анализируемого КК, по-прежнему содержит остаточные искажения.

Для повышения точности коррекции в настоящей статье фрагменты КК в окрестности точки i аппроксимированы полиномами четвертого порядка:

$$S(i+j) = C_{4i}j^4 + C_{3i}j^3 + C_{2i}j^2 + C_{1i}j + C_{0i}, \\ j \in [-n-1, n+1].$$

В этом случае оценка $\hat{S}_\Sigma(t)$ корректируется на основании выражения

$$\hat{S}(i) = \hat{S}_\Sigma(i) - \beta \frac{B - 4A}{12} - \alpha \left[A - \frac{B - 4A}{12} (1 + 6\alpha) \right], \quad (3)$$

где

$$A = 0.5 [\hat{S}_\Sigma(i+1) + \hat{S}_\Sigma(i-1)] - \hat{S}_\Sigma(i);$$

$$B = 0.5 [\hat{S}_\Sigma(i+4) + \hat{S}_\Sigma(i-4)] - \hat{S}_\Sigma(i);$$

$$\alpha = \sum_{j=-n}^n j^2 a_j; \quad \beta = \sum_{j=-n}^n j^4 a_j.$$

Результат коррекции в соответствии с (3) показан на рис. 4, г. Полученная оценка практически совпадает с искомым КК. Использование полиномов четвертого порядка при описании сигнала позволило получить более точную по сравнению с использованием полиномов второго порядка корректировку усредняемого КК. Это особенно актуально в задачах, направленных на исследование "тонкой" структуры ЭКС.

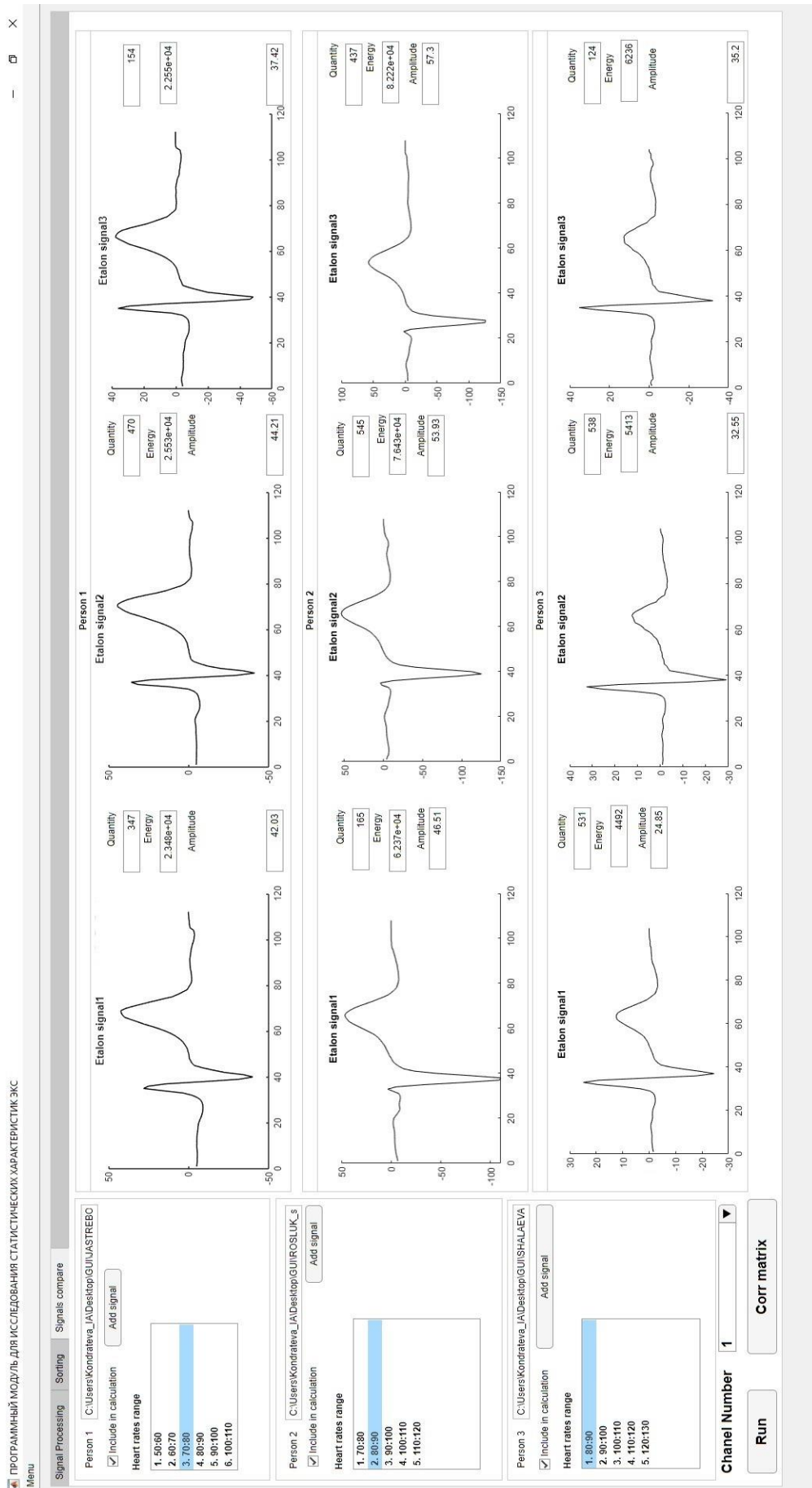


Рис. 5. Диалоговое окно программного модуля, позволяющее сохранить результат и провести сравнительный анализ эталонных кардиокомплексов для группы пациентов
Fig. 5. The dialog box of the software module, which allows you to save the result and conduct a comparative analysis of reference signals for several patients

На рис. 5 представлено диалоговое окно программного модуля, в котором реализован предложенный алгоритм. Исследователь может наблюдать эталонные (полученные в результате усреднения) КК для нескольких пациентов, а также получить информацию о количестве усредняемых КК и иных параметрах эталонных КК. Небольшое количество эталонных КК позволяет врачу-исследователю значительно сократить время, затрачиваемое на анализ ЭКС, а также отслеживать динамические изменения формы ЭКС при развитии различных патологий.

Другим важным направлением использования ПМ на базе алгоритма сортировки КК с посткоррекцией является проведение исследований статистических характеристик ЭКС для группы различных пациентов. На рис. 6 представлены эталонные КК для различных пациентов, полученные при сопоставимой ЧСС (использовалась база обезличенных суточных записей ЭКГ пациентов Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. акад. И. П. Павлова). Представленные КК соответствуют диапазону изменения ЧСС 70...80 ударов в минуту (считается, что в условиях обычной жизнедеятельности диапазон изменения ЧСС в большинстве случаев лежит в пределах 60...90 ударов в минуту [14], [15]).

Представленные на рис. 6 эталонные КК получены усреднением значительного количества КК N_n . Количество накопленных сигналов варьируется от 694 (для второго пациента) до 1148 (для четвертого пациента). Рис. 6 отражает различия КК у различных пациентов при регистрации в одном и том же отведении при одной и той же ЧСС (например, выборочный коэффициент корреляции между эталонными КК первого и третьего пациентов составляет всего 0.43).

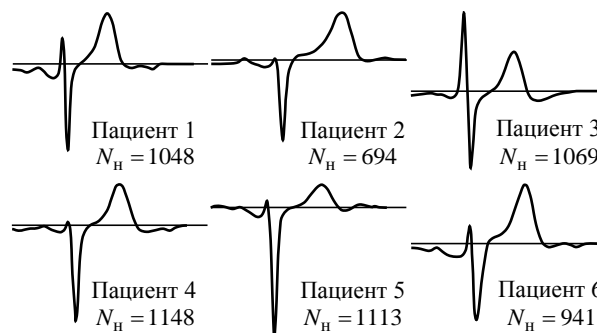


Рис. 6. Эталонные КК для ЧСС от 70 до 80 ударов в минуту

Fig. 6. Reference cardiac complexes for heart rate from 70 to 80 beats per minute

Выводы. В настоящей статье предложен алгоритм сортировки КК с посткоррекцией и представлен ПМ, реализованный на его базе в среде MatLab.

Программный модуль позволяет осуществлять предварительную обработку ЭКС, а также кластеризацию (сортировку по степени близости формы) КК. Небольшое количество получаемых эталонных КК позволяет врачу-исследователю значительно сократить время, затрачиваемое на анализ ЭКС, что является основой исследования динамических изменений формы и иных параметров КК как для конкретного пациента, так и для их группы.

В статье рассмотрено влияние ошибок синхронизации КК при их накоплении на форму эталонного КК. Показано, что классическое решение задачи деконволюции приводит к значительным ошибкам при нахождении оценки "истинной" формы КК.

На основании аналитических расчетов получены выражения для коррекции накапливаемого КК. Показано, что в результате коррекции становится возможным нивелировать ошибки накопления, связанные с рассинхронизацией. Указанный результат позволяет создать основу для решения задач, направленных на исследование "тонкой" структуры ЭКС.

Авторский вклад

Кондратьева Ирина Анатольевна – проведение аналитических расчетов для задачи коррекции формы кардиокомплекса, разработка структуры алгоритмов сортировки кардиокомплексов, проведение статистического анализа параметров электрокардиосигнала.

Красичков Александр Сергеевич – руководство работой, подготовка текста статьи.

Станчева Ольга Андреевна – подготовка текста статьи, участие в обсуждении результатов.

Мбазумутима Элиаким – проведение компьютерного моделирования.

Шикама Фабиен – проведение компьютерного моделирования.

Нифонтов Евгений Михайлович – постановка задачи и участие в обсуждении результатов.

Author's contribution

Irina A. Kondratyeva, carrying out of the analytical calculations for the task of correcting the shape of the cardio complex, developing the structure of algorithms for sorting cardio complexes, conducting a statistical analysis of the parameters of the electro cardio signal.

Alexander S. Krasichkov, management of the work and preparation of the paper text.

Olga A. Stancheva, preparation of the paper text, discussion of the results.

Eliachim Mbazumutima, computer simulation.

Fabian Shikama, computer simulation.

Evgeny M. Nifontov, statement of the problem and discussion of the results.

Список литературы

1. Красичков А. С., Нифонтов Е. М., Иванов В. С. Алгоритм сортировки кардиокомплексов для анализа длительных записей электрокардиосигнала // Биомедицинская радиоэлектроника. 2011. № 11. С. 24–28.
2. Siddiah N., Srikanth T., Satish Kumar Y. Nonlinear filtering in ECG Signal Enhancement // Intern. J. of Computer Science and Communication Networks. 2012. Vol. 2, iss. 1. P. 123–128. URL: https://www.researchgate.net/publication/268435345_Nonlinear_filtering_in_ECG_Signal_Enhancement (дата обращения 26.02.2021)
3. Hao W., Chen Y., Xin Y. ECG Baseline Wander Correction by Meanmedian Filter and Discrete Wavelet Transform // 2011 Annual Intern. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Boston, USA, 30 Aug. – 3 Sept. 2011. Piscataway: IEEE, 2011. Acc. № 12424657. doi: 10.1109/IEMBS.2011.6090744
4. Verma R., Mehrotra R., Bhateja V. An Integration of Improved Median and Morphological Filtering Techniques for Electrocardiogram Signal Processing // 2013 3rd IEEE Intern. Advance Computing Conf. (IACC). Ghaziabad, India, 22–23 Febr. 2013. Piscataway: IEEE, 2013. P. 1223–1228. doi: 10.1109/IAdCC.2013.6514402
5. Baseline Normalization of ECG Signals using Empirical Mode Decomposition and Mathematical Morphology / T. Y. Ji, Z. Lu, Q.H. Wu, Z. Ji // Electronic Lett. 2010. Vol. 43, № 6. P. 486–496.
6. Пипин В. В., Рагульская М. В., Чибисов С. М. Анализ динамических моделей и реконструкций ЭКГ при воздействии космо- и геофизических факторов // Международный журн. прикладных и фундаментальных исследований. Технические науки. 2009. № 5. С. 17–24.
7. Al-Kindi S. G., Reza T. Real-time Detection of Myocardial Infarction by Evaluation of ST-segment in Digital ECG // J. of Medical Imaging and Health Informatics. 2011. Vol. 1, iss. 3. P. 225–230. doi: 10.1166/jmihi.2011.1032
8. Analysis of the Possibility of Correcting the Shape of the Average Cardiac Complex in the Presence of Synchronization Errors during Accumulation / I. A. Kondratyeva, A. S. Krasichkov, E.M. Nifontov, F. Shikama // Intern. Youth Conf. on Electronics, Telecommunications and Information Technologies. Springer Proceedings in Physics. Vol. 255. Cham: Springer, 2020. P. 487–494. doi: 10.1007/978-3-030-58868-7_531
9. Correlation Analysis of heart Rate Variability between PPG and ECG for Wearable Devices in Different Postures / C.-C. Hsiao, F.-W. Hsu, R.-G. Lee, R. Lin // 2017 IEEE Intern. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Banff, AB, 5–8 Oct. 2017. Piscataway: IEEE, 2013. Acc. № 17379519. doi: 10.1109/SMC.2017.8123077
10. Kan Y., Kashiwara K. Automatic Detection of ST Depression on ECG // 2015 IEEE 4th Global Conf. on Consumer Electronics (GCCE). Osaka, Japan, 27–30 Oct. 2015. Piscataway: IEEE, 2015. Acc. № 15756665. doi: 10.1109/GCCE.2015.7398704
11. Hammond H. K., Kelly T. L., Froelicher V. Radio-nuclide Imaging Correlates of Heart Rate Impairment during Maximal Exercise Testing // J. of the American College of Cardiology. 1983. Vol. 2, № 5. P. 826–833. doi: 10.1016/s0735-1097(83)80228-911
12. Krasichkov A. S., Grigoriev E. B., Nifontov E. M. Influence of Myographic Interference and Isoelectric Line Drift on Correlation Coefficient in Classification of Cardiac complexes // Biomedical Engineering. 2015. Vol. 49, iss. 4. P. 220–223. doi: 10.1007/s10527-015-9533-7
13. A method to Synchronize Signals from Multiple Patient Monitoring Devices through a Single Input Channel for Inclusion in List-mode Acquisitions / J. M. O'Connor, P. H. Pretorius, K. Johnson, M. A. King // Medical Physics. 2013. Vol. 40, iss. 12. Art. 122502. doi: 10.1118/1.4828844
14. Pathoumvanh S., Hamamoto K., Indahak P. Arrhythmias Detection and Classification Base on single Beat ECG Analysis // The 4th Joint Intern. Conf. on Information and Communication Technology, Electronic and Electrical Engineering (JICTEE). Chiang Rai, Thailand, 5–8 Mars 2014. 4 p. Acc. № 14255947. doi: 10.1109/JICTEE.2014.6804097
15. Ma J. L., Zhang T. T., Dong M. C. A Novel ECG Data Compression Method using Adaptive Fourier Decomposition with Security Guarantee in E-health Applications // IEEE J. of Biomedical and Health Informatics. 2015. Vol. 19, iss. 3. P. 986–994. doi: 10.1109/JBHI.2014.2357841

Информация об авторах

Кондратьева Ирина Анатольевна – магистр по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" (2020), аспирант кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 4 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка биомедицинских сигналов.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: irikondr1721@gmail.com

Красичков Александр Сергеевич – доктор технических наук (2017), профессор (2020) кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – статистическая радиотехника; методы обработки сигналов.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: krass33@mail.ru

Станчева Ольга Андреевна – врач-оториноларинголог Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. акад. И. П. Павлова, младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения "Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи" Министерства здравоохранения Российской Федерации. Автор более 20 научных работ. Сфера интересов – клиническая медицина; оториноларингология; хирургия слезоотводящих путей.

Адрес: Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, ул. Льва Толстого, д. 6-8, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: olga.stancheva@yandex.ru

Мбазумутима Элиаким – магистр по направлению "Биотехнические системы и технологии" (2019), аспирант кафедры биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – цифровая обработка биомедицинских сигналов, машинное обучение, распознавание образов.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: eliachim2013@yandex.ru

Шикама Фабиен – магистр по направлению "Биотехнические системы и технологии" (2016), аспирант кафедры биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – цифровая обработка биомедицинских сигналов, протезирование и реабилитация.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: fshikama@mail.ru

Нифонтов Евгений Михайлович – доктор медицинских наук (2003), профессор (2009) Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. акад. И. П. Павлова. Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – фундаментальная медицина; кардиология.

Адрес: Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, ул. Льва Толстого, д. 6-8, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: nifontov@spmu.rssi.ru

References

1. Krasichkov A. S., Nifontov E. M., Ivanov V. S. Classification algorithm for complexes in long term ECG data records. Bio-medical Radio Electronics. 2011, no. 11, pp. 24–28. (In Russ.)

2. Siddiah N., Srikanth T., Satish Kumar Y. Nonlinear filtering in ECG Signal Enhancement. Intern. J. of Computer Science and Communication Networks. 2012, vol. 2, iss. 1, pp. 123–128. Available at: https://www.researchgate.net/publication/268435345_Nonlinear_filtering_in_ECG_Signal_Enhancement (accessed 2021/02/26)

3. Hao W., Chen Y., Xin Y. ECG Baseline Wander Correction by Meanmedian Filter and Discrete Wavelet Transform. 2011 Annual Intern. Conf. of the IEEE Engineering in Medi-

cine and Biology Society. 30 Aug.–3 Sept. 2011, Boston, USA. Piscataway, IEEE, 2011, acc. no. 12424657. doi: 10.1109/IEMBS.2011.6090744

4. Verma R., Mehrotra R., Bhateja V. An Integration of Improved Median and Morphological Filtering Techniques for Electrocardiogram Signal Processing. 2013 3rd IEEE Intern. Advance Computing Conf. (IACC). 22–23 Febr. 2013, Ghaziabad, India. Piscataway, IEEE, 2013, pp. 1223–1228. doi: 10.1109/IAdCC.2013.6514402

5. Ji T. Y., Lu Z., Wu Q. H., Ji Z. Baseline Normalization of ECG Signals using Empirical Mode Decomposition and Mathematical Morphology. Electronic Lett. 2010, vol. 43, no. 6, pp. 486–496.

6. Pipin V. V., Ragulskaya M. V., Chibisov S. M. Analysis of dynamic models and ECG reconstructions under the influence of cosmo- and geophysical factors. *J. of Applied and Fundamental Research. Technical sciences*. 2009, no. 5. pp. 17–24. (In Russ.)
7. Al-Kindi S. G., Reza T. Real-time Detection of Myocardial Infarction by Evaluation of ST-segment in Digital ECG. *J. of Medical Imaging and Health Informatics*. 2011, vol. 1, iss. 3, pp. 225–230. doi: 10.1166/jmihi.2011.1032
8. Kondratyeva I. A., Krasichkov A. S., Nifontov E. M., Shikama F. Analysis of the Possibility of Correcting the Shape of the Average Cardiac Complex in the Presence of Synchronization Errors during Accumulation. *Intern. Youth Conf. on Electronics, Telecommunications and Information Technologies. Springer Proceedings in Physics*. Cham, Springer, 2020, vol. 255, pp. 487–494. doi: 10.1007/978-3-030-58868-7_531
9. Hsiao C.-C., Hsu F.-W., Lee R.-G., Lin R. Correlation Analysis of heart Rate Variability between PPG and ECG for Wearable Devices in Different Postures. *2017 IEEE Intern. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. 5–8 Oct. 2017, Banff, AB. Piscataway, IEEE, 2013, acc. no. 17379519. doi: 10.1109/SMC.2017.8123077
10. Kan Y., Kashiwara K. Automatic Detection of ST Depression on ECG. *2015 IEEE 4th Global Conf. on Consumer Electronics (GCCE)*. 27–30 Oct. 2015, Osaka, Japan. Piscataway, IEEE, 2015, acc. no. 15756665. doi: 10.1109/GCCE.2015.7398704
11. Hammond H. K., Kelly T. L., Froelicher V. Radionuclide Imaging Correlates of Heart Rate Impairment during Maximal Exercise Testing. *J. of the American College of Cardiology*. 1983, vol. 2, no 5, pp. 826–833. doi: 10.1016/s0735-1097(83)80228-911
12. Krasichkov A. S., Grigoriev E. B., Nifontov E. M. Influence of Myographic Interference and Isoelectric Line Drift on Correlation Coefficient in Classification of Cardiac Complexes. *Biomedical Engineering*. 2015, vol. 49, iss. 4, pp. 220–223. doi: 10.1007/s10527-015-9533-7
13. O'Connor J. M., Pretorius P. H., Johnson K., King M. A. A method to Synchronize Signals from Multiple Patient Monitoring Devices through a Single Input Channel for Inclusion in List-mode Acquisitions. *Medical Physics*. 2013, vol. 40, iss. 12, art. 122502. doi: 10.1118/1.4828844
14. Pathoumvanh S., Hamamoto K., Indahak P. Arrhythmias Detection and Classification Base on single Beat ECG Analysis. *The 4th Joint Intern. Conf. on Information and Communication Technology, Electronic and Electrical Engineering (JICTEE)*. Chiang Rai, Thailand. 5–8 Mar. 2014, acc. no. 14255947, 4 p. doi: 10.1109/JICTEE.2014.6804097
15. Ma J. L., Zhang T. T., Dong M. C. A Novel ECG Data Compression Method using Adaptive Fourier Decomposition with Security Guarantee in E-health Applications. *IEEE J. of Biomedical and Health Informatics*. 2015, vol. 19, iss. 3, pp. 986–994. doi: 10.1109/JBHI.2014.2357841

Information about the authors

Irina A. Kondratyeva, Master (2020) in Infocommunication Technology and Communication Systems, postgraduate student of the Department of Radio Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 4 scientific publications. Area of expertise: digital processing of biomedical signals.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: irikondr1721@gmail.com

Alexander S. Krasichkov, Dr. Sci. (Eng.) (2017), Professor (2020) of the Department of Radio System of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: statistical radio engineering; signal processing.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: krass33@mail.ru

Olga A. Stancheva, MD, ENT-doctor at ENT department of Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Junior Researcher of Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech (the Ministry of Health). The author of more than 20 scientific publications. Area of expertise: clinical medicine; otorhinolaryngology, dacryology.
Address: Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, 6-8 L'va Tolstogo St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: olga.stancheva@yandex.ru

Eliachim Mbazumtima, Master (2019) in Biotechnical Systems and Technologies, postgraduate student of the Department of Bioengineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 1 scientific publication. Area of expertise: digital processing of biomedical signals; machine learning; pattern recognition.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: eliachim2013@yandex.ru

Fabian Shikama, Master (2016) in Biotechnical Systems and Technologies, postgraduate student of the Department of Bioengineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: digital processing of biomedical signals; prosthetics and rehabilitation.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: fshikama@mail.ru

Evgeny M. Nifontov, Dr. Sci. (Medicine) (2003), Professor (2009) of Pavlov First Saint Petersburg State Medical University. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: fundamental medicine; cardiology.
Address: Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, 6-8 L'va Tolstogo St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: nifontov@spmu.rssi.ru