

## КОМПЬЮТЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА ИШЕМИИ НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛОКАЛЬНО ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММ

Ромм Я.Е.<sup>1</sup>, Соколов И.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Таганрогский государственный педагогический институт имени А.П. Чехова», Таганрог, Россия (347900, Таганрог, ул. Инициативная, 48), e-mail: romm@list.ru

Излагается метод компьютерной диагностики ишемической болезни сердца на основе приближения изолинии и идентификации точек  $j$  в процессе обработки электрокардиограмм (ЭКГ) в цифровом формате. Подход к программной идентификации диагностических признаков основан на выделении экстремальных элементов ЭКГ при помощи алгоритма сортировки. Процесс обработки ЭКГ происходит с разбиением анализируемого отведения кардиограммы на интервалы R-R. Представлены способы программного приближения изолинии с помощью идентификации экстремальных особенностей и углов наклона касательных к графику ЭКГ. В процессе диагностики выполняется автоматическое определение числовых параметров метода, оценка достоверности и качества диагностики. Метод ориентирован на обработку большого количества ЭКГ с целью предварительной диагностики ишемической болезни и предназначен для поддержки принятия решения cardiолога, устанавливающего окончательный диагноз. Излагаются наиболее существенные компоненты программной реализации метода, его применение иллюстрируются примерами обработки реальных ЭКГ.

Ключевые слова: компьютерная диагностика, обработка цифровых электрокардиограмм, алгоритм устойчивой сортировки, идентификация экстремумов на основе сортировки, автоматическое приближение изолинии, идентификации точек  $j$  и признаков ишемии.

## COMPUTERIZED DIAGNOSTICS OF ISCHEMIA BASED ON ECG LOCALLY EXTREME FEATURES IDENTIFICATION

Romm Y.E.<sup>1</sup>, Sokolov I.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Taganrog State Pedagogical Institute named after A.P. Chehov, Taganrog, Russia (347900, Taganrog, Inicativnaya Street, 48), e-mail: romm@list.ru

In this article the method of computer diagnosis of coronary heart disease based on the approximation of isoline and identify points  $j$  in the processing of digital electrocardiograms (ECG) is present. The approach to software identification of diagnostic features is based on the selection of extreme elements of the ECG with the aid of sorting algorithm. The processing of the ECG is performed by divided analyzed ECG leads into R-R intervals. The software methods for isoline approaching by identifying the characteristics and under extreme angles tangent to the graph of the ECG are represented. The numerical parameters of the method, the evaluation of reliability and quality of the diagnosis are in the diagnostic process automatically detects. The method is focused on the processing of large quantities of ECG to the provisional diagnosis of coronary artery disease and is designed to support decision-making cardiologist establishing the final diagnosis. The most significant components of the software implementation of the method are expounded. The application is illustrated by examples of workable ECG processing.

Keywords: computer diagnostics, processing of digital electrocardiograms, stable sorting algorithm, the identification of extremes based on sorting, automatic isoline approach, points  $j$  and signs of ischemia identification.

**Введение.** Проблема ранней диагностики коронарогенных поражений миокарда актуальна [9] по причине роста числа сердечно-сосудистых заболеваний. Важную роль для решения проблемы играет оценка адекватности коронарного кровотока неинвазивными методами, используемыми для выявления скрытой ишемической болезни сердца (ИБС). Применение для этой цели компьютерной диагностики может ускорить работу врача, сократить время обработки длительных участков ЭКГ, повысить эффективность массовых

(скрининговых) обследований населения, скорректировать влияние человеческого фактора [1].

Отличительными особенностями ИБС являются наличие экстремумов и перегибов в непосредственной окрестности комплекса *QRS* [9]. Ставится задача выделить характерные экстремальные особенности ишемии и на этой основе осуществить компьютерную диагностику данного заболевания. Подход к решению опирается на алгоритм сортировки и идентификацию на этой основе экстремальных элементов массива оцифрованных данных по значению и местоположению.

**Описание метода.** Работа сердца в норме представляет циклический процесс с частотой 60-90 ударов в минуту, на графике ЭКГ при этом формируются зубцы *P*, *Q*, *R*, *S*, *T* и *U*, соответствующие определенным фазам сердечбиения. Анализ этих зубцов, образованных ими интервалов и сегментов позволяет диагностировать работу сердца. Для каждой фазы определены медицинские нормы, отклонения от которых являются патологией или характеризуют различные сердечные заболевания [2]. ИБС характеризуется некрозом мышечных тканей сердца и нарушением их электропроводимости, что отражается в характере сегмента *RS-T* (отрезок от конца комплекса *QRS* до начала зубца *T*, соответствующий периоду полного охвата возбуждением обоих желудочков). Переход от фазы распространения волны возбуждения в базальных отделах межжелудочковой перегородки, правого и левого желудочков к фазе полного охвата возбуждением обоих желудочков на ЭКГ отображается как переход от комплекса *QRS* к сегменту *RS-T* [2] и отмечается точкой *j* («junction», англ.) как точкой начала сегмента *RS-T*.

Наиболее достоверными диагностическими критериями ишемии миокарда являются три следующих электрокардиографических признака [3].

1. Горизонтальное или косонисходящее снижение (депрессия) сегмента *RS-T* на 1.0 мм (0.1 мВ) и более от исходного уровня при условии, если такое снижение сохраняется на протяжении не менее 80 мс от точки соединения *j*.
2. Медленное косовосходящее снижение (депрессия) сегмента *RS-T* на 1.0 мм и более от исходного уровня при условии, если такое снижение сохраняется на протяжении не менее 80 мс от точки соединения *j*.
3. Подъем сегмента *RS-T* на 1.0 мм и более от исходного уровня на протяжении 80 мс от точки соединения.

Для компьютерной обработки ЭКГ представляется в виде числового массива амплитуд кардиосигналов всех отведений, выбор отведения ниже предполагается выполненным оператором. Инвариантный относительно отведения алгоритм диагностики ИБС включает следующие этапы: разбиение отведения на отдельные интервалы *R-R*,

приближение изолинии, идентификация точки  $j$ , анализ сегментов  $RS-T$  по точкам  $j$  и  $j+80$  мс для каждого интервала  $R-R$  и постановка диагноза по всем сегментам  $RS-T$  обрабатываемого отведения. Ниже детализируется описание данных этапов, отмечаемых римскими цифрами.

**I. Разбиение отведения на отдельные интервалы  $R-R$**  реализуется с помощью идентификации зубцов  $Q$  ( $S$ ) и  $R$ , согласно методу, изложенному в [8], [10]. Кардиосигналы участка ЭКГ сортируются по неубыванию, и выполняется идентификация всех локально максимальных и локально минимальных элементов в окрестности, радиус которой соответствует временному интервалу 3 мс. В окрестности каждого локализованного минимума определяется наибольшая разность между кардиосигналами слева в интервале 20 мс и его значением. Значения разностей заносятся в массив, характеризующий максимальные отклонения кардиосигналов от локальных минимумов слева. Аналогично формируется массив, характеризующий максимальные отклонения кардиосигналов от локальных минимумов справа. Таким же способом формируются массивы максимальных отклонений кардиосигналов от локальных максимумов слева и справа с той разницей, что от значений локальных максимумов вычитаются значения кардиосигналов из означенного интервала. Все четыре массива сортируются по неубыванию. В каждом из них определяется максимальная разность соседних элементов и ее местоположение. Наибольшая из указанных разностей для локальных максимумов идентифицирует приращение зубца  $R$ . Индексы идентифицированных зубцов  $R$  заносятся в отдельный массив и сортируются в хронологическом порядке. Каждая пара соседних индексов зубцов  $R$  определяет границы соответствующего им интервала  $R-R$ . Аналогично идентифицируются зубцы  $Q$  и  $S$ : найденные данным способом слева от ближайшего зубца  $R$  минимумы принимаются за вершины зубцов  $Q$ , справа – за вершины зубцов  $S$ .

**II. Приближение изолинии.** Для диагностики ишемии требуются значения приращений по ординатам кардиосигналов в точках  $j$  и  $j+80$  мс относительно изолинии. В случае реального смещения (дрейфа) изолинии либо определяется ее приближение, либо сложный участок не анализируется ввиду недопустимой зашумленности. Приближение изолинии предлагается выполнить на основе анализа сегмента  $T-P$  (в случае отсутствия зубца  $U$ ) и  $U-P$  (в случае его наличия). Анализируемое отведение ЭКГ разбивается на последовательные интервалы  $R-R$ . Для каждого интервала  $R-R$  формируются графики полусумм арктангенсов ( $PsAtg$ ) соседних разностей кардиосигнала в каждой точке, разности составляются справа налево между значением кардиосигнала на расстоянии  $l$  справа от текущей точки и значением кардиосигнала в ней (одно данное для вычисления  $PsAtg$ ) аналогично – между значением кардиосигнала в этой же точке и сигналом на расстоянии  $l$

слева от нее (второе данное для вычисления  $PsAtg$ ). Значение параметра  $l$ , при котором отличительные характеристики фрагмента сегмента  $T-P$  ( $U-P$ ) наиболее выражены, априори не известно, оно определяется программно следующим образом. Формируется множество графиков  $PsAtg$ , каждый из которых представляет собой результат использования фиксированного параметра  $l$  из всех возможных натуральных числовых значений в диапазоне от 5 мс до 30 мс. На всех таких графиках в границах промежутка  $[R' + \frac{1}{3}(R'' - R'), R'']$  где  $R'$  – начало анализируемого интервала  $R-R$ , а  $R''$  – его конец, рассматриваются все возможные подынтервалы, ограниченные индексами локально экстремальных значений и длительностью более 40 мс. Каждому из них ставится в соответствие отношение модуля разности наибольшего и наименьшего значения  $PsAtg$  в пределах анализируемого подынтервала к его длине. Подынтервал с наименьшим отношением принимается за вспомогательный фрагмент сегмента  $T-P$  ( $U-P$ ), его границы обозначаются  $A$  и  $B$  (рис. 1). Кардиосигналы фрагмента рассматриваются в качестве приближений к точкам изолинии, на практике они имеют отклонения в обе стороны от изолинии. В предположении, что распределение отклонений в обе стороны вдоль оси ординат одинаково, для идентифицированного фрагмента  $AB$  итерационно строится прямая, алгебраическая сумма модулей отклонений в обе стороны кардиосигналов от которой минимальна на  $[A, B]$ . Прямая проводится через точки  $A_i$  и  $B_i$  с абциссами  $A$  и  $B$  соответственно, ординаты этих точек определяются итерационно на основе минимизации невязки суммы отклонений расстояний всех кардиосигналов на  $[A, B]$  от проводимых прямых [9]. На выходе итераций отрезок  $A_i B_i$  принимается за приближение изолинии на  $[A, B]$  на  $i$ -м интервале  $R-R$ , координаты точек  $A_i$  и  $B_i$  заносятся в двумерный массив  $M$ , такое построение выполняется для каждого интервала  $R-R$ , при этом массив  $M$  при каждом  $i$  дополняется очередной парой элементов  $A_i, B_i$ . После анализа всех интервалов  $R-R$  элементы массива  $M$  сортируются по абциссам точек. Отсортированный массив представляет собой массив координат отрезков ломаной, которая окончательно принимается за искомое приближение изолинии всего анализируемого отведения ЭКГ. Достоверность приближения, как будет отмечено ниже, оценивается пользователем на основании уровня зашумленности, характеризуемого соотношениями экстремального характера.

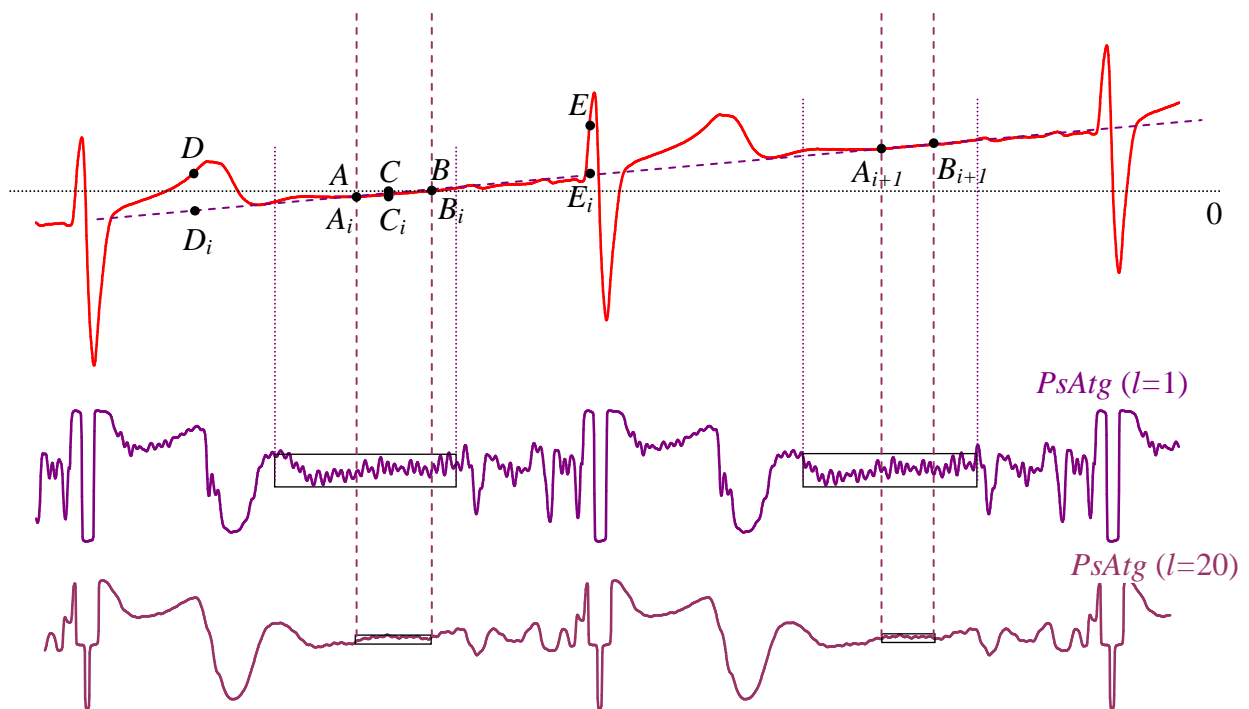


Рис. 1 Приближения изолинии с помощью графиков  $PsAtg$  ( $l=1$  и  $l=20$ )

Далее для диагностики ишемии требуется определить уровни точек  $j$  и  $j+80$  относительно приближения изолинии.

**III. Идентификация точки  $j$ .** Для требуемой идентификации на каждом интервале  $R-R$  выбирается фрагмент, обозначаемый  $PjI$  (point  $j$  identification), длиной в пять раз меньшей длины данного интервала от вершины правого зубца левого комплекса  $QRS$ . Правый зубец комплекса  $QRS$  определяется на основе анализа взаимного расположения зубцов  $Q$ ,  $S$  и  $R$ , идентифицируемых в качестве экстремумов при помощи сортировки в п. I. С целью исключить ошибку и не идентифицировать в качестве точки  $j$  элемент комплекса  $QRS$  выполняется дополнительный анализ максимального изменения кардиосигнала слева и справа от каждой из вершин рассматриваемых зубцов в окрестности радиуса  $20$  мс. Кардиосигналы фрагмента  $PjI$  заносятся в отдельный массив. В случае убывания первых элементов массива все его элементы умножаются на  $-1$ , в результате первые элементы образуют возрастающую подпоследовательность, это позволит идентифицировать точку  $j$  инвариантно относительно типа зубца, от вершины которого начинается фрагмент  $PjI$ . Для преобразованного массива формируются графики разности арктангенсов ( $GRAtg$ ) соседних разностей кардиосигнала составляемых справа налево между значением в текущей точке и сигналом на расстоянии  $l$  слева и справа от нее. Для каждого графика  $l$  принимает фиксированное значение и изменяется от графика к графику в диапазоне от  $1$  мс до  $25$  мс. Выбирается то значение  $l$ , при котором разность двух наибольших локальных экстремумов графика  $GRAtg$ , взятая по модулю, максимальна. Предполагается, что это указывает на наиболее предпочтительное начальное положение абсциссы точки  $j$  (рис. 2). Дальнейшее

уточнение местоположения точки  $j$  итеративно воспроизводится с уменьшением начального значения  $l$  на 1 до тех пор, пока разница в индексах точки  $j$  на двух соседних итерациях не превысит 4 мс или не станет равным 1. Значение  $l$  на выходе итераций определяет окончательное приближение индекса (абсциссы) точки  $j$ , ордината которой определяется по значению соответствующего кардиосигнала ЭКГ. Абцисса точки  $j+80$  мс определяется на соответствующем расстоянии справа от идентифицированной точки  $j$ , затем выполняется определение ее ординаты. Детальное описание и обоснование выбора параметров, а также полный код программы, реализующей изложенный процесс, даны в [9].

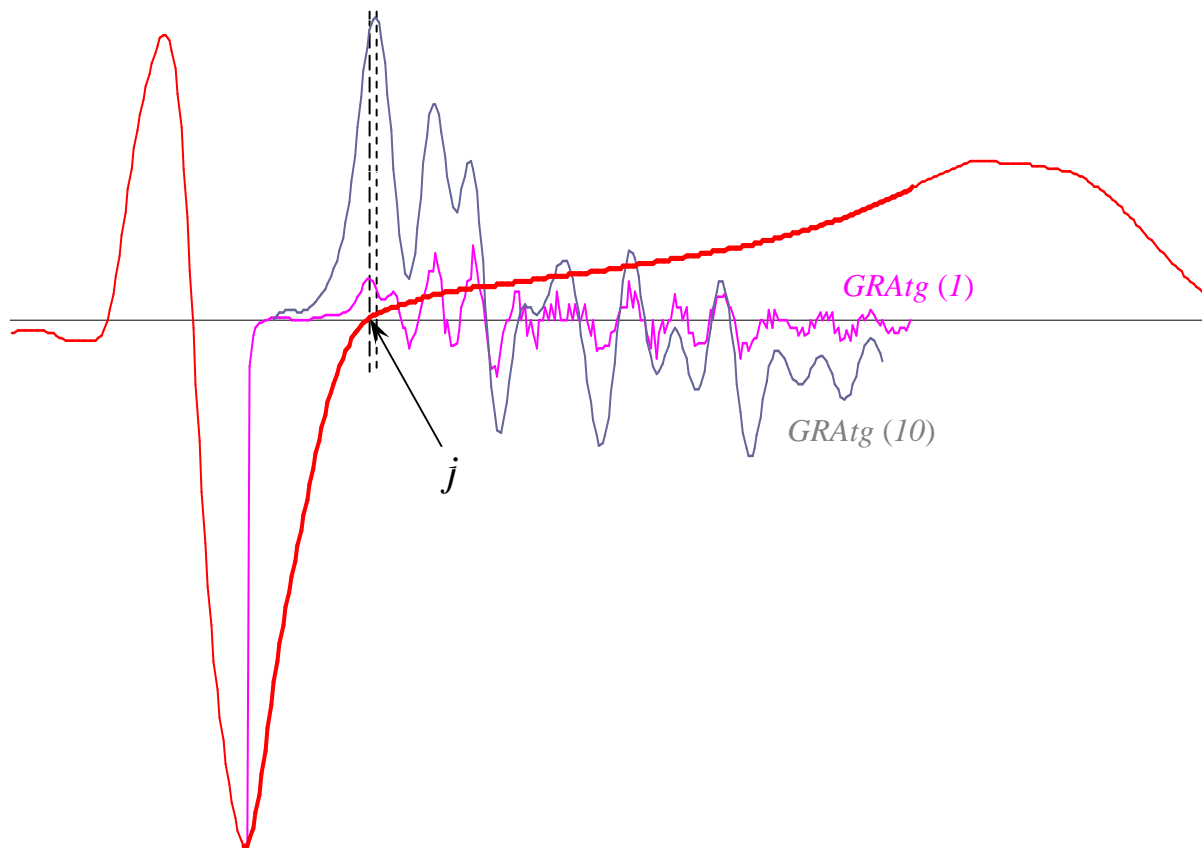


Рис. 2. Идентификация местоположения точки  $j$  с помощью графиков  $GRAtg$ .

Остается определить превышение кардиосигналов в точках  $j$  и  $j+80$  мс относительно построенного приближения изолинии.

**IV. Анализ сегментов  $RS-T$  и постановка диагноза.** Одновременное превышение кардиосигналов на 0.1 мВ и более в идентифицированных точках характеризует подъем (элевацию) сегмента  $RS-T$  не менее чем на 0.1 мВ (1.0 мм ЭКГ стандартного вида) от исходного уровня на протяжении 80 мс от точки  $j$ , что является критерием идентификации ИБС с признаками трансмуральной ишемии миокарда [3]. Аналогично значение кардиосигнала относительно изолинии в обеих точках менее -0.1 мВ расценивается как снижение (депрессия) сегмента  $RS-T$  на  $\geq 0.1$  мВ от исходного уровня на протяжении 80 мс от точки  $j$ , что является критерием идентификации ИБС с признаками субэндокардиальной

ишемии миокарда [3]. По совокупности результатов, полученных при анализе всех сегментов *RS-T* текущего отведения, делается предварительный вывод о наличии или отсутствии признаков ИБС на анализируемом участке ЭКГ. Окончательный диагноз ставит кардиолог с использованием результатов изложенного компьютерного анализа в графической, текстовой или электронной форме.

**Границы достоверности.** Изложенный метод приближения изолинии и точек  $j$  и  $j+80$  мс ориентирован на зашумленные ЭКГ. Степень зашумленности влияет на длину фрагмента *AB* (рис. 1), на качество приближения и точность идентификации искомых точек (рис. 2). В качестве критерия допустимой зашумленности используется максимум отношения модуля разности наибольшего и наименьшего значений кардиосигналов фрагмента *AB* к модулю разности наибольшего и наименьшего значений кардиосигналов, соответствующего фрагменту интервала *R-R* (максимальное отношение величины шума на прямолинейном участке к максимальному диапазону кардиосигнала). Численное значение критерия оценивается кардиологом и учитывается при окончательной постановке диагноза. В целом предполагается, что представленный метод является вспомогательным для кардиолога и используется под его контролем в качестве автоматизированного средства поддержки принятия решения с целью окончательной постановки диагноза.

**Заключение.** На основе программной идентификации экстремумов с использованием алгоритма сортировки предложен компьютерный метод предварительного выявления характерных для трансмуральной и субэндокардиальной ишемии миокарда особенностей ЭКГ. Метод включает автоматическое приближение изолинии, идентификацию зубцов *Q* (*S*) и *R*, точек  $j$  и  $j+80$  мс и в целом предоставляет автоматизированное средство поддержки принятия решения кардиологом для окончательной постановки диагноза. Алгоритмы, на которых основан метод, отличаются от известных по построению, а также по качеству идентификации диагностических признаков в условиях зашумленности кардиосигналов.

### Список литературы

1. Дроздов Д.В., Леванов В.М. Автоматический анализ ЭКГ: проблемы и перспективы // Здоровоохранение и медицинская техника. – 2004. - №1. – С. 25-27.
2. Мурашко В.В., Струтынский А.В. Электрокардиография / Мурашко В.В., Струтынский А.В. – М.: МЕДпресс-информ, 2011. – 320 с.
3. Ройтберг Г. Е., Струтынский А. В. Внутренние болезни. Сердечно-сосудистая система / Ройтберг Г. Е., Струтынский А. В. – М.: МЕДпресс-информ, 2007. – 855 с.

4. Ромм Я.Е. Метод вычисления нулей и экстремумов функций на основе сортировки с приложением к поиску и распознаванию. I // Кибернетика и системный анализ. – 2001. - № 4. – С. 142 – 158.
5. Ромм Я.Е. Метод вычисления нулей и экстремумов функций на основе сортировки с приложением к поиску и распознаванию. II // Кибернетика и системный анализ. – 2001. - № 5. – С. 81 – 101.
6. Ромм Я.Е. Параллельная сортировка слиянием по матрицам сравнений. I // Кибернетика и системный анализ. – 1994. - № 5. – С. 3 – 23.
7. Ромм Я.Е. Параллельная сортировка слиянием. Приложение к вычислению нулей, экстремумов функций и распознаванию образов. – Таганрог: Изд-во ТГПИ, 1998. – 190 с.
8. Ромм Я.Е., Соколов И.Н. Компьютерное диагностирование аритмии, тахикардии и брадикардии с применением схем сортировки // «Известия ЮФУ. Технические науки», 2013. - №7 – С. 131-136.
9. Ромм Я.Е., Соколов И.Н. Компьютерная идентификация ишемии по результатам обработки ЭКГ / ТГПИ. – Таганрог: 2013, 80 с. ДЕП в ВИНТИ 19.07.2013, № 214 – В2013.
10. Ромм Я.Е., Соколов И.Н. Компьютерное определение зубцов R и Q электрокардиограмм при анализе ритма сердечных сокращений на основе схем сортировки / ТГПИ. – Таганрог: 2012, 42 с. ДЕП в ВИНТИ 22.03.2012, № 102 – В2012.

**Рецензенты:**

Веселов Г.Е., д.т.н., профессор, профессор кафедры синергетики ТК ЮФУ, декан факультета информационной безопасности ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет», г.Таганрог.

Карелин В.П., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Прикладной математики и информационных технологий ТИУиЭ, г.Таганрог.