

УДК 621.317+616.12-073.97-71

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОАМПЛИТУДНЫХ КАРДИОСИГНАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

*Г.М. Теттин, И.А. Латфуллин, Л.Э. Мамедова*

### Аннотация

В данной работе приведен анализ характеристик низкоамплитудных кардиосигналов (НАКС) с использованием частотно-временного картирования. Для анализа использовались вейвлет-преобразования.

### Введение

Компьютерная кардиография – появившееся сравнительно недавно новое направление в медицине – позволяет регистрировать низкоамплитудные кардиосигналы, не видимые на обычной электрокардиограмме (ЭКГ). Для прогноза протекания кардиозаболеваний существенным фактором является электрическая нестабильность миокарда. С целью повышения качества диагностики нами разработана методика анализа поздних потенциалов желудочков (ППЖ) как одного из видов низкоамплитудного высокочастотного кардиосигнала (НАКС). Сигналы ППЖ регистрируются в конечной части комплекса QRS (общепринятый медицинский термин, отражающий электропотенциалы желудочков сердца на ЭКГ) и описывают процессы замедленного проведения электрического сигнала в миокарде. Некоторые специалисты – кардиологи – считают появление ППЖ одним из предикторов внезапной смерти [1].

Как показывает практика, в настоящее время медики не имеют возможности глубоко исследовать природу НАКС [1]. Несмотря на используемую ими высокочувствительную технику, анализ НАКС остается, как правило, описательным, без использования количественных критериев. К сожалению, это сильно ограничивает возможности анализа.

Традиционно ППЖ регистрируются методом сигналоусредненной электрокардиографии [1]. Однако сердце является динамической системой, и потому его состояние должно оцениваться по электрическим параметрам в каждый момент времени. Таким образом, перспективен разрабатываемый нами метод анализа поздних потенциалов сердца без временного и пространственного усреднений. Этот факт является существенной особенностью нашего исследования низкоамплитудных кардиосигналов по сравнению с традиционными методами.

### 1. Аппаратура

Для решения проблемы перехода к развернутому по времени и пространству кардиосигналу разработан оригинальный электрокардиограф сверхвысокого разрешения [2], который позволяет с большой точностью регистрировать поздние потенциалы желудочков (ППЖ), в том числе и в различных отведениях [3].

Прибор выполнен на базе промышленного одноканального электрокардиографа ЭК1Т 03М2 и позволяет вести запись электрических потенциалов сердца как

традиционно, на бумажной ленте, так и в памяти компьютера. Дополнительный электронный блок позволяет подключать его к порту последовательной передачи данных персонального компьютера. Применённая схема гальваноразвязки снимает риск нанесения вреда здоровью пациента от попадания высокого напряжения от РС. Во время снятия электрокардиограммы оператор видит развёртку электрокардиосигнала на экране монитора. Электрокардиограмма записывается на жёсткий диск. Поскольку все входные цепи промышленного кардиографа сохранены, то входные характеристики компьютерного электрокардиографа такие же, как и у прототипа.

Аналоговый сигнал с кардиографа усиливается и оцифровывается двенадцатиразрядным аналого-цифровым преобразователем. Далее параллельный цифровой код преобразуется в последовательный и через оптоэлектронную развязку считывается компьютером. Развязка необходима для безопасности пациента, если возникнет аварийная ситуация и высокое напряжение попадёт на контакты порта последовательной передачи данных компьютера. Узел управления обеспечивает согласованную работу АЦП и преобразователя кода.

Опытный прибор успешно прошел медицинские испытания в отделении кардиологии Больницы скорой медицинской помощи (БСМП) г. Казани.

## 2. Анализ

С помощью описанного выше прибора была собрана база данных, содержащая более 10000 записей кардиосигналов. Обследовались две группы людей: группа условно здоровых (190 человек) и группа пациентов кардиологического отделения БСМП г. Казани (290 человек). Сигналы снимались в двенадцати классических отведениях. Некоторые пациенты проходили обследование в течение нескольких дней (на 1-е, 2-е, 3-е, 7-е и так далее сутки пребывания в стационаре). Все записи ЭКГ анализировались на предмет содержания в них сигналов ППЖ с использованием критериев Симсона [4], и для дальнейшего анализа было отобрано 309 записей с ППЖ.

Ранее для исследования ППЖ нами применялись быстрые преобразования Фурье. С результатами этих исследований можно ознакомиться в предыдущих публикациях [5–7].

В своем новом исследовании мы применяем так называемые вейвлет-преобразования для составления частотно-временной карты сигнала.

Скажем несколько слов о причинах, побудивших нас перейти от преобразований Фурье к вейвлет-преобразованиям. Преобразование Фурье и ряды Фурье являются прекрасным математическим аппаратом для физической интерпретации процессов при анализе характеризующих их сигналов. Однако иногда они оказываются недостаточно эффективными. Обычно в медицине применяются простые преобразования Фурье, которые не позволяют наблюдать изменение сигнала со временем, а дают частотную картину сигнала, усредненную по времени (в том числе, и 2D-Фурье анализ). В то же время, в случае исследования кардиосигналов информация о таких изменениях может представлять значительный интерес для медиков. Таким образом, для проведения более глубокого и подробного анализа НАКС было решено применить новый метод анализа – вейвлет-преобразование.

Вейвлет-преобразование не так широко известно, поскольку применяется сравнительно недавно, и математический аппарат находится в стадии активной разработки. В отличие от преобразования Фурье, вейвлет-преобразование обеспечивает двумерную развертку исследуемого одномерного сигнала, при этом частота и координата рассматриваются как независимые переменные. В результате появляется возможность анализировать свойства сигнала одновременно в физическом (время, координата) и в частотном пространствах [8].

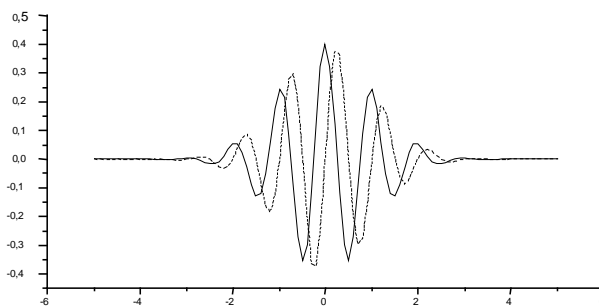


Рис. 1. Вейвлет Морле. Сплошной линией изображена действительная часть вейвлета, пунктирной – мнимая

При анализе НАКС из числа наиболее распространенных и изученных на сегодня вейвлет-функций нами был выбран вейвлет Морле (рис. 1), представляющий собой гармоническое колебание, промодулированное функцией Гаусса, так как он дает хорошую локализованность как во временной, так и в частотной областях:

$$\psi(t) = \exp(-t^2/\alpha^2) [\exp(ik_0t) - \exp(-k_0^2\alpha^2/4)],$$

где  $k_0$  – частота плоской волны, а параметр  $\alpha$  задает ширину гауссианы. Обычно выбирают  $\alpha^2 = 2$  и  $k_0 = 2\pi$ .

### 3. Результаты

На первоначальном этапе было проанализировано 30 записей кардиосигнала с сигналами ППЖ. Записи выбирались таким образом, чтобы можно было проследить изменение частотно-временной картины сигнала со временем у одного пациента.

Для каждого сигнала вычислялись вейвлет-спектр и модуль комплексного спектра, то есть амплитудный спектр, в котором колебания вдоль оси времени отсутствуют.

Приведем примеры полученных изображений (рис. 2).

На всех рисунках по оси абсцисс отложено время в миллисекундах. По оси ординат отложены периоды колебаний в миллисекундах. Об амплитуде можно судить по цветовой индикации.

Анализ спектров вейвлет-преобразований позволяет нам наблюдать эволюцию сигнала на протяжении выбранного нами отрезка электрокардиограммы (как это видно из рис. 2).

Анализ модулей спектров позволяет нам более точно, чем на самом спектре, выделить частоты с наибольшей амплитудой. Например, на рис. 3 можно выделить частоты 50 Гц и 17 Гц.

Наибольший интерес для нас представляла область высоких частот, поэтому при дальнейшем анализе мы уменьшили полосу частот, и нижней границей приняли 55 Гц.

Как уже было сказано выше, нами отбирались такие записи, по которым можно было бы отслеживать динамику частот для отдельных пациентов. Из накопленного материала выделяли случаи, когда одного и того же пациента обследовали несколько раз в течение длительного отрезка времени.

Рассматривалось два вида динамики: 1) кратковременная динамика и 2) длительная динамика.

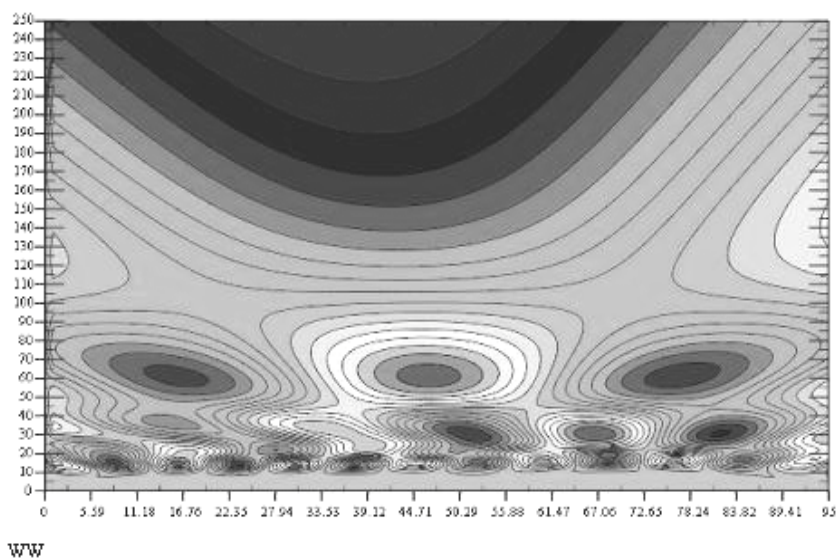


Рис. 2. Вейвлет-спектр. Обследуемый № 412, 4-е грудное отведение, 2-й день обследования. Диагноз: крупноочаговый обширный инфаркт миокарда передней стенки левого желудочка

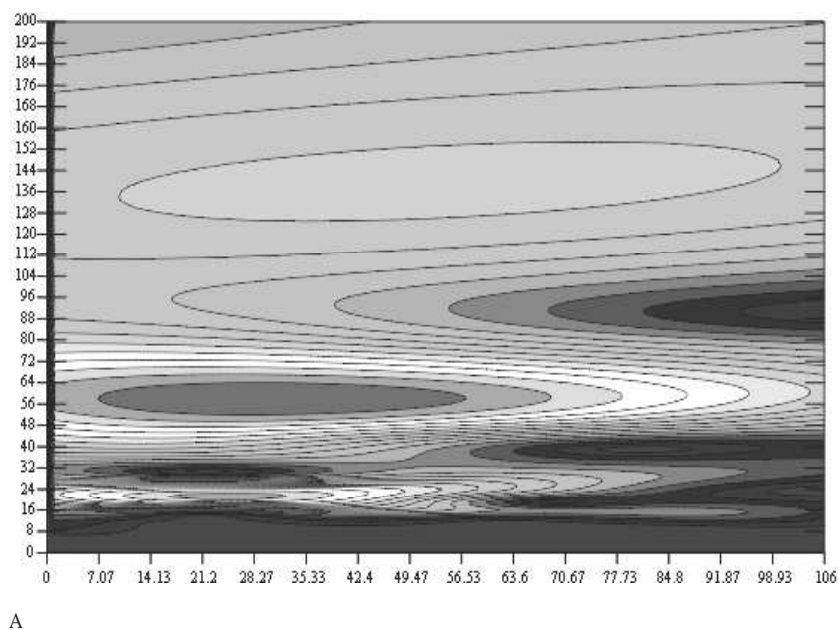


Рис. 3. Модуль вейвлет-спектра. Обследуемый № 7, 1-е грудное отведение, 1-й день обследования. Диагноз: крупноочаговый обширный инфаркт миокарда передней стенки левого желудочка, ишемическая болезнь сердца (ИБС)

Кратковременной динамикой параметров ППЖ мы называем динамику параметров в течение одной регистрации. Параметры ППЖ каждого отдельно взятого QRS комплекса отличаются от параметров ППЖ соседних QRS комплексов. Таким образом, исследовались изменения параметров ППЖ при переходе от одного QRS комплекса к другому.

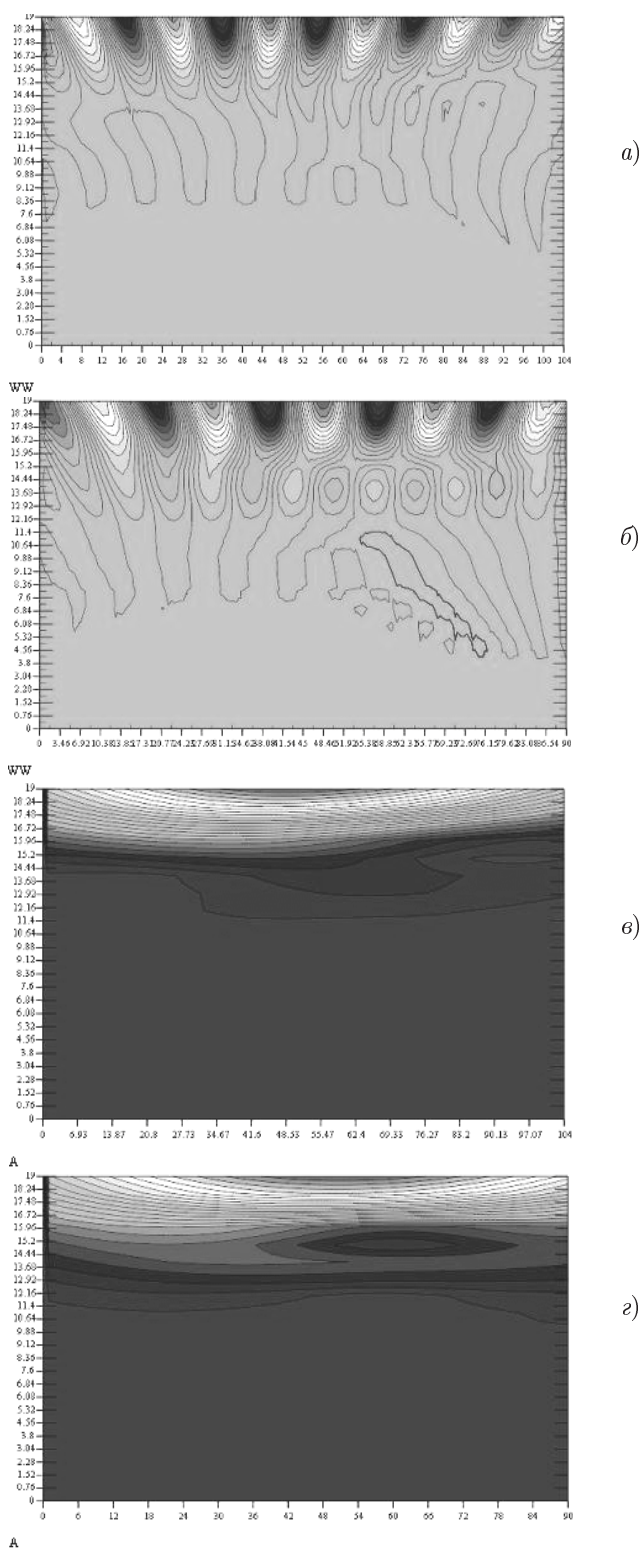


Рис. 4. Пациентка № 235. 1-е грудное отведение. Второй день наблюдения. Диагноз: мелкоочаговый инфаркт миокарда, постинфарктный кардиосклероз (ПИКС)

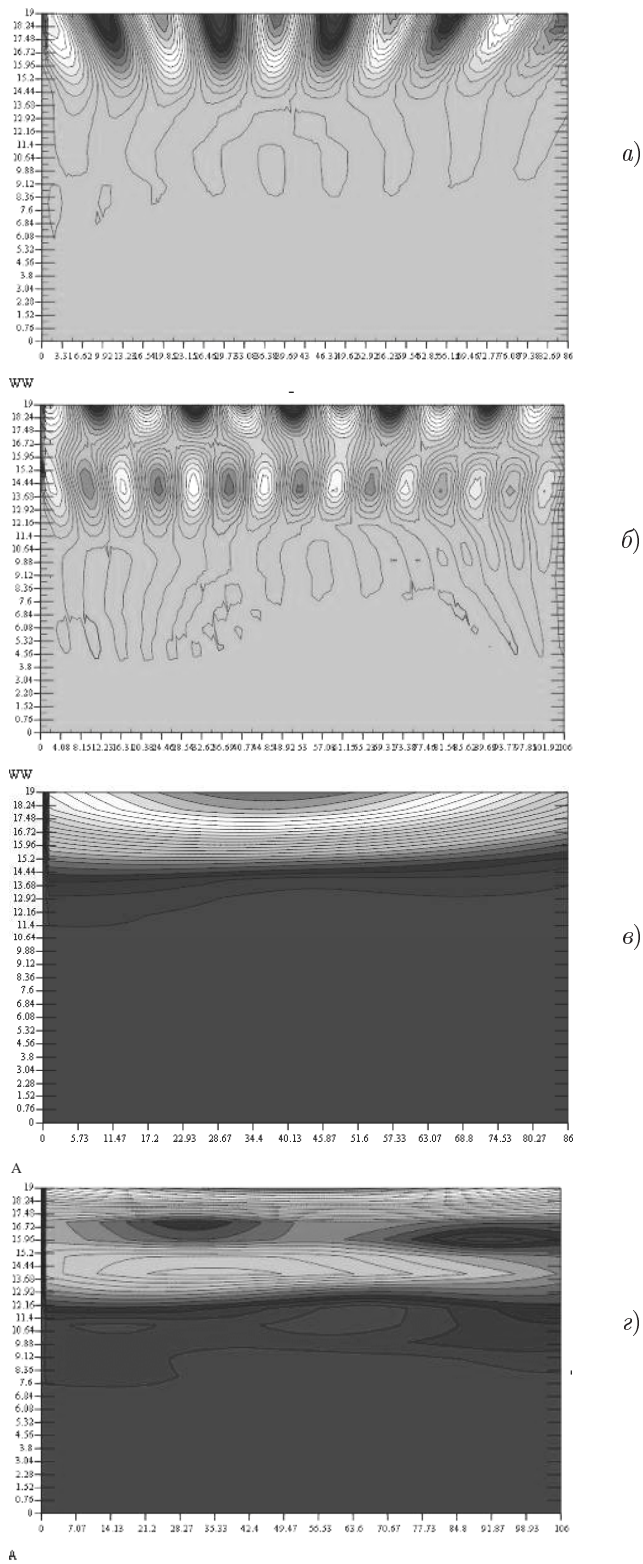


Рис. 5. Пациентка № 235. 2-е грудное отведение. Второй день наблюдения. Диагноз: мелкоочаговый инфаркт миокарда (ПИКС)

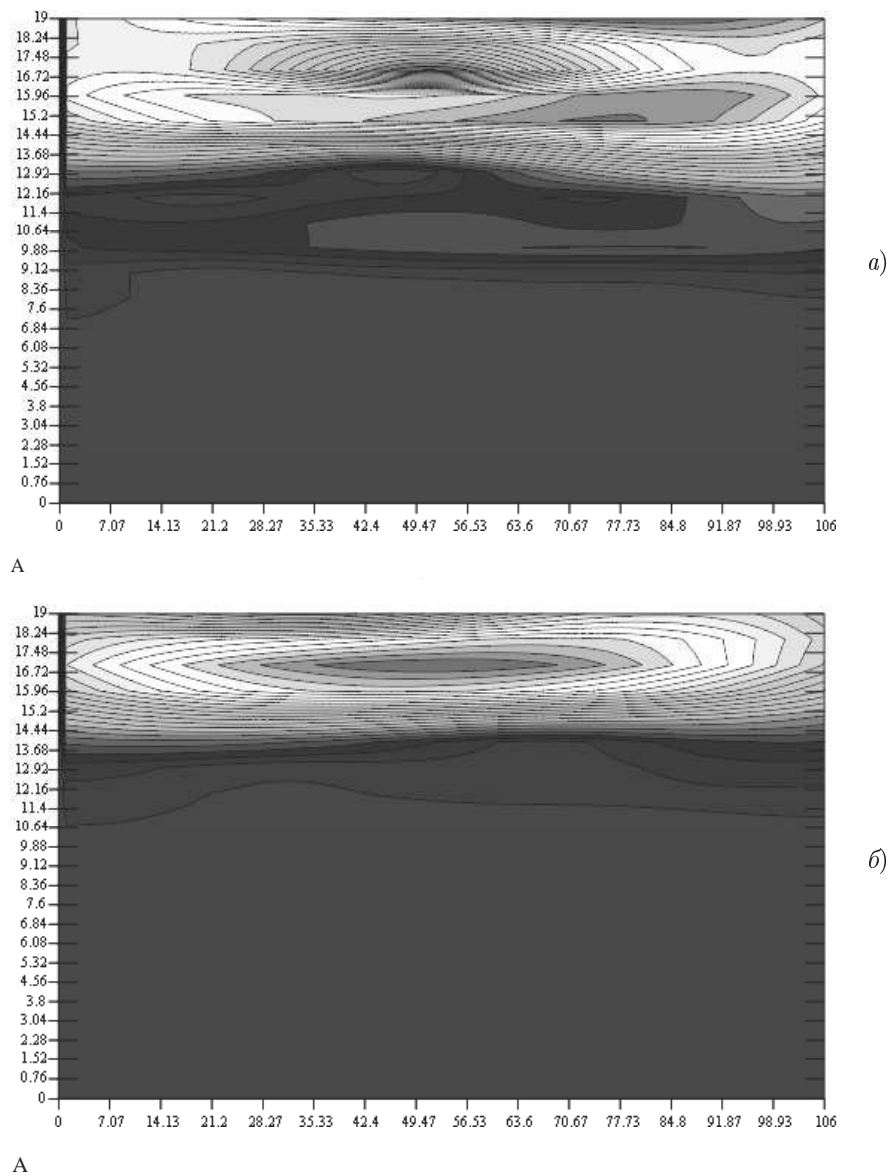


Рис. 6. Пациент № 28. Шестое грудное отведение. Первый день наблюдения (а) и второй день наблюдения (б). Диагноз: повторный инфаркт миокарда, нарушение ритма (ПИКС)

Под длительной динамикой мы подразумеваем изменения параметров сигналов ППЖ в течение нескольких дней. В исследовании длительной динамики параметров использовались данные только по группе пациентов кардиологического отделения БСМП г. Казани, так как только в группе пациентов данные снимались в течение нескольких дней.

Приведем примеры исследования кратковременной динамики (рис. 4, 5).

В первом приведенном примере для анализа были взяты два последовательных QRS комплекса. Как можно заметить, наблюдается небольшое изменение частотной картины. Рис. 4, а и 4, в соответствуют первому QRS комплексу, рис. 4, б и 4, г – второму.

Во втором примере были также взяты два последовательных QRS комплекса. В данном случае наблюдаемые изменения картины гораздо более существенны (рис. 5). Появились новые составляющие, соответствующие частотам 90 Гц и 71 Гц.

Подобные исследования сигналов ППЖ методом частотно-временного картирования приводятся также другими авторами [9]. В данном исследовании для построения частотно-временной карты сигнала применяется метод быстрого преобразования Фурье с использованием множественных узкополосных фильтров [9]. Авторы выделили частоты, сходные с полученными нами.

Далее приведем примеры исследования долговременной динамики (рис. 6).

В данном примере проиллюстрировано изменение частотно-временной картины сигнала с интервалом один день. При обоих измерениях наблюдалась одна и та же частота 58 Гц. На второй день в сигнале выделились дополнительные составляющие, соответствующие частотам 66 Гц, 77 Гц, 83 Гц и 100 Гц.

### Заключение

1. Разработан новый метод анализа низкоамплитудных кардиосигналов на базе оригинального электрокардиографа сверхвысокого разрешения.

2. Применение метода построения частотно-временной карты сигнала с помощью вейвлет-преобразований показало высокую эффективность при диагностировании кардиозаболеваний, в частности обнаружены появления новых высокочастотных составляющих при исследовании кратковременной и долговременной динамики низкоамплитудных кардиосигналов.

### Summary

*G.M. Teptin, I.A. Latfullin, L.E. Mamedova.* Investigations of low-amplitude cardia signal characteristics by use the wavelet transformations.

In this paper the analysis of low amplitudinal cardial signals by use the spectral and time-domain mapping are considered. The wavelet transformation are used also for this analysis.

### Литература

1. Practical management of cardial arrhythmias / Ed. by N. El-Sherif and J. Lekieffre. – N. Y.: Futura Publishing, 1997. – 377 p.
2. *Teptin G.M., Katcevtan M.M., Kontourov S.V., Latfullin I.A., Teplov V.Ju., Shornikov V.O.* Complementary equipment for computer electrocardiography // Instruments and Experimental Technicues. – 2001. – V. 44, No 4. – P. 559–562.
3. *Контуров С.В., Тептин Г.М., Ким З.Ф., Латфуллин И.А.* Методика выявления ППЖ и анализ ППЖ спектральными методами // Вестн. аритмологии. – 1999. – № 13. – С. 54–58.
4. *Simson M.B.* Use of signals in the terminal QRS complex to identify patients with ventricular tachycardia after myocardial infarction // Circulation. – 1981. – V. 64. – P. 235–242.
5. *Teptin G.M., Kontourov S.W., Mamedova L.E., Latfoullin I.A.* Analysis of low amplitude cardial signals and its interpretation // Environmental radioecology and applied ecology. – 2004. – V. 10, No 1. – С. 3–8.
6. *Латфуллин И.А., Тептин Г.М., Мамедова Л.Э.* Исследование локализаций поздних потенциалов желудочков // Вестн. аритмологии. – 2005. – № 39. – С. 124.



7. Мамедова Л.Э., Тептин Г.М., Латфуллин И.А. Шумовые характеристики низкоамплитудных кардиосигналов и их анализ по локализации // Прием и обработка информации в сложных информационных системах. – Казань, 2005. – С. 120–126.
8. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // УФН. – 1996.– Т. 166, № 111. – С. 1145–1170.
9. Жданов А.М., Пономаренко В.Б., Трыкова И.А., Шестаков В.А. . Определение поздних потенциалов желудочков с помощью спектрально-временного картирования комплекса QRS у больных с полной атриовентрикулярной блокадой // Вестн. аритмологии. – 2005. – № 41. – С. 58–60.

Поступила в редакцию  
11.09.06

---

**Тептин Герман Михайлович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоастрономии Казанского государственного университета.

E-mail: [teptin@erae.kazan.ru](mailto:teptin@erae.kazan.ru)

**Латфуллин Ильдус Анварович** – доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой внутренних болезней № 2 Казанского государственного медицинского университета.

**Мамедова Лола Энверовна** – аспирант Казанского государственного университета.

E-mail: [mle81@mail.ru](mailto:mle81@mail.ru)