

УДК 537.86+621.317+616.12-073.97-71

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОАМПЛИТУДНЫХ КАРДИОСИГНАЛОВ

*Г. М. Тептин*¹, *И. А. Латфуллин*², *Л. Э. Мамедова*¹, *З. Ф. Ким*³

¹ Казанский федеральный университет;

² Реабилитационный центр МЧС Республики Татарстан;

³ Казанский медицинский университет, г. Казань, Россия

В работе представлены результаты экспериментального исследования низкоамплитудных кардиосигналов без временного и пространственного усреднения. Впервые статистически надёжно определены характеристики флуктуационной и квазипериодической составляющих низкоамплитудных сигналов. Приводятся результаты исследований периодической и квазипериодической составляющих по данным многолетних измерений. Обнаружено, что структура частотных характеристик низкоамплитудных сигналов имеет заметную временную изменчивость в соседних кардиоциклах.

ВВЕДЕНИЕ

В статье приводятся результаты многолетних исследований характеристик низкоамплитудных кардиосигналов, полученных при помощи оригинального компьютерного электрокардиографа, разработанного на кафедре радиоастрономии Казанского госуниверситета [1]. Актуальность таких исследований обусловлена тем, что согласно современным воззрениям кардиологов [2] наличие низкоамплитудных кардиосигналов, в частности поздних потенциалов жедудочка, является одним из основных предикторов внезапной смерти. Трудности исследований сигналов поздних потенциалов жедудочка обусловлены как их шумовым характером, так и низкими амплитудами. До сих пор не выявлены их основные свойства и природа (см. обзоры [3–6]). В основном ранее были получены только усреднённые характеристики частот поздних потенциалов жедудочка [3–7].

Целью данной работы была реализация методики обработки большого массива данных измерений низкоамплитудных кардиосигналов, получение статистических закономерностей сигналов поздних потенциалов жедудочка без временного усреднения, а также проводимое впервые исследование закономерностей флуктуационной и квазипериодической составляющих низкоамплитудных кардиосигналов. Были проведены многочисленные измерения частотных характеристик поздних потенциалов жедудочка без временного усреднения, проанализированы полученные результаты и сделаны количественные выводы.

1. АППАРАТУРА

На кафедре радиоастрономии Казанского госуниверситета был разработан и изготовлен базовый компьютерный электрокардиограф высокого разрешения на основе серийного одноканального электрокардиографа ЭК1Т 03 М2 [1]. Данный прибор позволяет вести запись электрических потенциалов сердца как традиционно (на бумажной ленте), так и в памяти компьютера. Основные технические характеристики электрокардиографа подробно приводятся в [1].

Во время снятия электрокардиограммы (ЭКГ) развёртка электрокардиосигнала видна на экране монитора. Цифровые отсчёты сигнала записываются на жёсткий диск в файл, который затем обрабатывается цифровыми методами. Если необходимо более детальное исследование полученного сигнала, то, теоретически, его можно полностью восстановить по дискретным отсчётам,

т. к. его можно считать сигналом с ограниченным спектром, и частота дискретизации удовлетворяет требованию теоремы Котельникова. Описываемый прибор испытывался в кардиологическом отделении больницы скорой медицинской помощи г. Казани. Прибор прошёл медицинские испытания, имеется акт о его внедрении в эксплуатацию.

Осуществление проекта даёт возможность получить существенные дополнительные характеристики низкоамплитудных кардиосигналов (например, поздних потенциалов желудочков сердца). Таким образом, появляются возможности для улучшения диагноза и прогнозирования лечения сердечно-сосудистых заболеваний. Можно также отметить, что компьютеризация не только расширяет возможности численного анализа кардиограмм, но и значительно улучшает общие технические характеристики такого прибора (точность измерения и т. д.). В частности, поздние потенциалы желудочков сердца, очень важные в современной кардиологии характеристики, не могут быть зарегистрированы без усреднения при стандартной записи электрокардиограммы, но отчётливо проявляются при компьютерном анализе [2].

2. ВЫДЕЛЕНИЕ НИЗКОАМПЛИТУДНЫХ КАРДИОСИГНАЛОВ

Оцифрованный сигнал, полученный с помощью компьютерного электрокардиографа, подвергается фильтрации, для реализации которой был разработан блок программ. Электрокардиограмма очищается от сетевой наводки комплексом цифровых фильтров, реализованных программными методами, которые удаляют из полученного спектра частоты, близкие к частоте промышленной сети, и их вторые гармоники. Записи, прошедшие цифровую обработку, использовались в дальнейших исследованиях.

Для проведения практических исследований с помощью вышеописанного метода было обследовано 795 человек. Кардиосигналы снимались в 12 классических отведениях в течение нескольких дней для каждого пациента [2]. Таким образом была набрана база данных, содержащая более 15 000 электрокардиограмм.

Электрокардиограмма представляет собой последовательность сигналов (P, Q, R, S, T-зубцы), каждый из которых соответствует определённым процессам в сердечной мышце [3]. Фазу сокращения миокарда отображает так называемый комплекс QRS-зубцов. Исследуемые нами низкоамплитудные сигналы поздних потенциалов желудочков наблюдаются в конечной части QRS-комплекса (см. рис. 1).

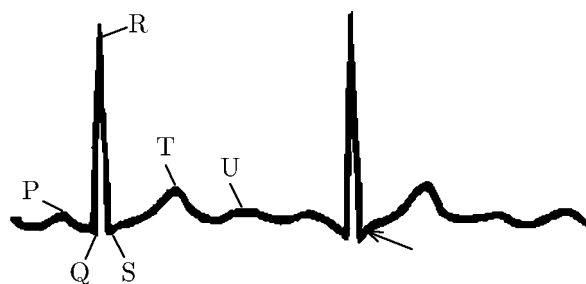


Рис. 1. Схематичное изображение электрокардиограммы (один кардиопикл). Стрелкой обозначена терминальная область комплекса QRS, где наблюдаются сигналы поздних потенциалов желудочков

Каждая содержащаяся в базе данных запись проверялась на наличие в ней сигналов поздних потенциалов желудочков как одной из разновидностей низкоамплитудных кардиосигналов. Для этого использовались принятые в кардиологии классические критерии Симсона [3]:

- 1) продолжительность так называемого комплекса QRS должна быть не меньше 114 мс;
- 2) продолжительность низкоамплитудных (менее 40 мкВ) сигналов терминальной части комплекса QRS должна быть не меньше 38 мс;
- 3) среднеквадратичная амплитуда последних 40 мс комплекса QRS должна быть более 20 мкВ;

Поздние потенциалы желудочков считались обнаруженными при соблюдении двух из трёх условий. Проведение такого анализа потребовало специального программного обеспечения, кото-

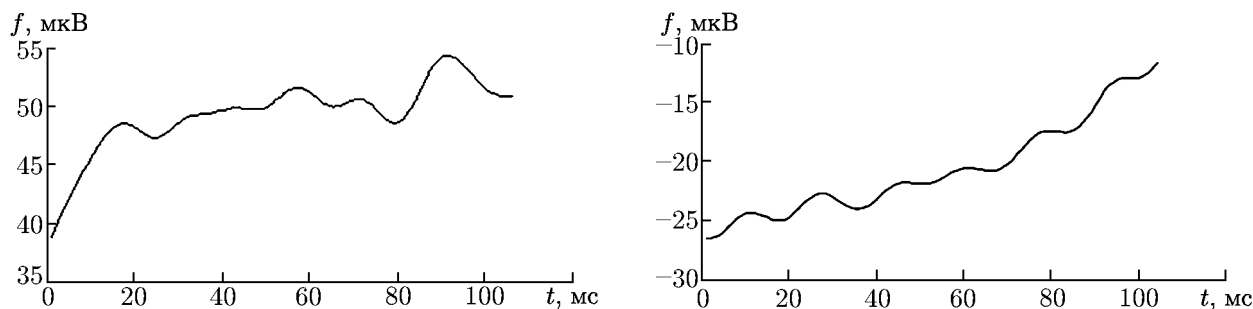


Рис. 2. Примеры регистрации поздних потенциалов желудочков на аппаратуре Казанского госуниверситета

рое было разработано на кафедре радиоастрономии Казанского госуниверситета.

В результате анализа по вышеописанной методике было зафиксировано более 800 случаев регистрации поздних потенциалов желудочков. Типичный вид регистрации поздних потенциалов желудочков для двух различных пациентов приведён в качестве примера на рис. 2.

Отметим, что традиционно поздние потенциалы желудочков определяют методом сигнал-усреднённой электрокардиографии (СУ-ЭКГ) [4], проводя временной анализ по Симсону [3]. Используемый исследователями [4] метод заключается в усреднении последовательных кардиоциклов (до $200 \div 500$), что позволяет им выделять низкоамплитудные полезные сигналы из «остаточных шумов».

Однако метод СУ-ЭКГ обладает существенными недостатками: при непостоянных характеристиках поздних потенциалов желудочков (продолжительность, конфигурация, периодичность возникновения) высока вероятность сглаживания сигналов высокой частоты, кроме того, возможны искажения сигнала шумом фильтров и других внешних источников.

Работающее сердце — это динамическая система со стохастическими параметрами, состояние которой должно оцениваться по электромагнитным характеристикам в каждый момент времени [6]. Это определяет актуальность поиска новых современных методов обработки и представления кардиосигналов. Перспективным в этом отношении является разработанная нами аппаратура [1] и методика анализа низкоамплитудных кардиосигналов без временного и пространственного усреднения, что помогает избежать искажения компонент реального сигнала и получить более информативные дополнительные данные о сигнале [1, 2]. Из всей записи электрокардиограммы для каждого кардиоцикла выделялись участки, в которых наблюдались низкоамплитудные кардиосигналы, затем эти участки последовательно анализировались, а результаты анализа сравнивались.

Разработанная методика анализа низкоамплитудных кардиосигналов даёт нам возможность исследовать отдельно новые характеристики — флуктуационную и квазипериодическую составляющие сигнала при анализе регистраций кардиосигналов и их спектров, что невозможно было получить традиционными методами СУ-ЭКГ [3–5].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ФЛУКТУАЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИГНАЛА

Для анализа флуктуационной части низкоамплитудных кардиосигналов нами использовались ряды амплитудных измерений поздних потенциалов желудочков (см. в качестве примера данные для двух различных независимых регистраций измерений амплитуд, приведённые на рис. 2). Наша методика позволяет определить тип распределения зарегистрированных амплитуд в каждом измерении поздних потенциалов желудочков и вычислить значение параметра распределения, что

определяет новую, ранее не измеряемую [3–7], количественную оценку низкоамплитудных кардиосигналов. Кроме того, анализ шумовых характеристик низкоамплитудных кардиосигналов в различных отведениях позволяет дополнительно определять местоположение (локализацию) источников сигналов на сердце, их размеры и некоторые другие параметры.

Для каждой регистрации участка с низкоамплитудными кардиосигналами выдвигались гипотезы о виде функции распределения и применялись критерии согласия Колмогорова и χ^2 с различными доверительными интервалами [8]. Поскольку в литературе (см. обзоры [3–7]) пока нет информации о вероятных характеристиках распределения амплитуд в сигналах поздних потенциалов желудочков, в качестве базовых нами использовались широко известные распределения Гаусса, Рэлея и Пуассона. Хорошо известно [8–12], что каждое из них соответствует различным моделям шумовых характеристик.

В то же время, как хорошо известно из радиофизических исследований (по статистической радиофизике, распространению радиоволн в ионосфере и в других областях) [8–12], наиболее распространённое нормальное распределение, или распределение Гаусса, характеризует процессы шумового характера, на которые одновременно влияет множество разных факторов. Как видно из медицинских обзоров низкоамплитудных кардиосигналов [3–7], механизмы формирования поздних потенциалов желудочков тоже характеризуются многофакторностью (хотя до нашего анализа шумовые количественные характеристики пока не исследовались).

Довольно часто при практическом анализе шумов в радиофизике используется распределение Пуассона, которое характеризует вероятность распределения случайных редких событий [11]. В качестве примера отметим распределение амплитуд радиоотражений от ионизированных метеорных следов в метровом радиодиапазоне [10]. Распределение Пуассона, очевидно, является другим предельным случаем распределения шумовых характеристик, что не противоречит некоторым механизмам поздних потенциалов желудочков согласно обзорам низкоамплитудных кардиосигналов [3–7].

В качестве промежуточного вида распределения шумовых характеристик мы выбрали распределение Рэлея (хотя это и выглядит пока недостаточно обоснованно; другие исследователи могут предложить рассмотреть и другие виды распределений).

Данным образом анализировались 326 записей низкоамплитудных сигналов. Результаты ана-

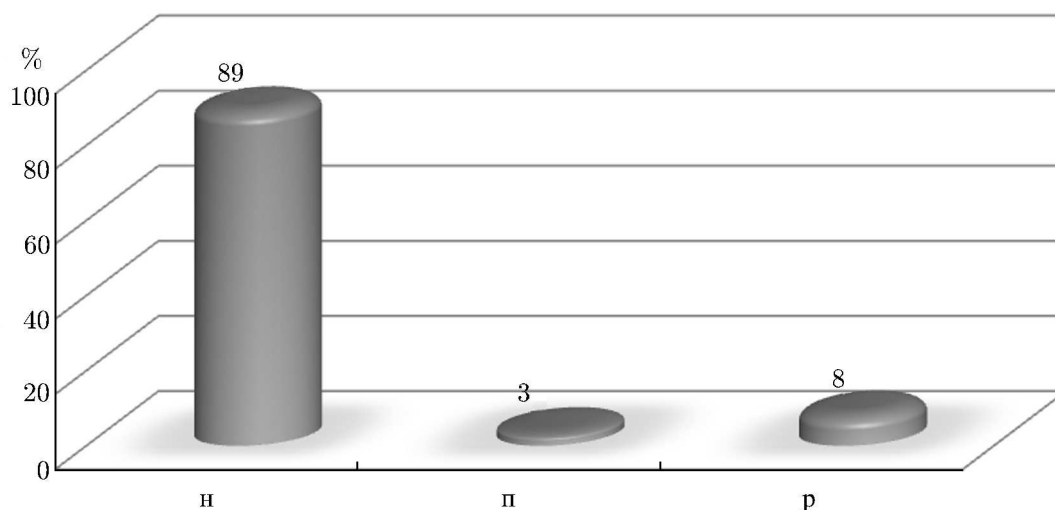


Рис. 3. Гистограмма количества записей низкоамплитудных сигналов, соответствующих различным распределениям (р — рэлеевское, п — пуассоновское, н — нормальное, или гауссово)

лиза представлены на рис. 3. В результате проведённого нами анализа выяснилось, что практически все полученные записи подчиняются нормальному закону распределения. По-видимому, это свидетельствует о том, что в большинстве случаев регистрации поздних потенциалов желудочков сигналы из разных областей миокарда появляются независимо друг от друга и не совпадают ни по времени, ни по амплитуде. Из 326 регистраций рэлеевскому распределению с дисперсией от 1,4 до 27,8 удовлетворяют 26 (8%), пуассоновскому распределению с константой λ от 2,19 до 15,09 соответствуют 10 (3%), нормальному закону с дисперсией от 0,23 до 3,61 — 290 (89%). Использовался критерий согласия χ^2 с 95-процентным доверительным интервалом.

Необходимо обратить внимание, что, хотя рэлеевских и пуассоновских распределений шумовых характеристик низкоамплитудных кардиосигналов значительно меньше, тем не менее эти характеристики должны учитываться в конкретных случаях данных пациентов и их заболеваний.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ И КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ НИЗКОАМПЛИТУДНЫХ СИГНАЛОВ

Чтобы проанализировать периодическую и квазипериодическую составляющие низкоамплитудных кардиосигналов необходимо рассмотреть спектры для отдельных записей. Для получения спектров использовалось преобразование Фурье. Далее, как и для самих записей, для спектров также выдвигались гипотезы о виде функции распределения с различными доверительными интервалами. Полученные результаты представлены на рис. 4.

Из 291 реализации полученного спектра 144 (49,5%) оказались нормальными с дисперсией от 0,002 до 1,52, 85 реализаций (29,2%) пуассоновскими с константой распределения λ от 0,0007 до 3,02, 62 (21,3%) — рэлеевскими с дисперсией от 0,004 до 1,11. Таким образом, распределения амплитуд частотных спектров отдельных регистраций низкоамплитудных кардиосигналов показывают, что почти половина из них обусловлена действием большого количества независимых источников квазипериодических сигналов для данной регистрации поздних потенциалов желудочков. Почти треть спектров (29%) обусловлена источниками в виде редких событий (распределение Пуассона). Примерно 20% амплитуд спектров подчиняются рэлеевскому распределению, т. е. промежуточному между большим количеством независимых источников квазипериодических сигналов для данной регистрации поздних потенциалов желудочков и источниками в виде редких событий (распределения Пуассона).

Как уже упоминалось выше [3–7], для частотного анализа низкоамплитудных кардиосигналов ранее использовались только методы, основанные на анализе усреднённых сигналов. Для более детального анализа нами был применён аппарат вейвлет-преобразований [13, 14], который позволил получить подробности частотных вариаций внутри каждого отдельного кардиоцикла. Такой анализ характеристик низкоамплитудных кардиосигналов проводится впервые. Для анализа нами использовалось вейвлет-преобразование Морле, выбранное по следующим причинам:

1) Обычно выбирают преобразование, наиболее подходящее по классу исследуемых функций, или из соображений построения адекватной модели. Поскольку использование СУ-ЭКГ ранее показало квазипериодический характер вариаций сигнала поздних потенциалов желудочков [3–7], логично применить для анализа вейвлет-преобразование Морле, которое обычно применяют при анализе периодических и квазипериодических процессов [13, 14].

2) Анализ записей кардиосигнала методом вейвлет-преобразований позволяет исследовать частотно-временную картину сигнала и более детально рассмотреть флуктуации различных частотных составляющих.

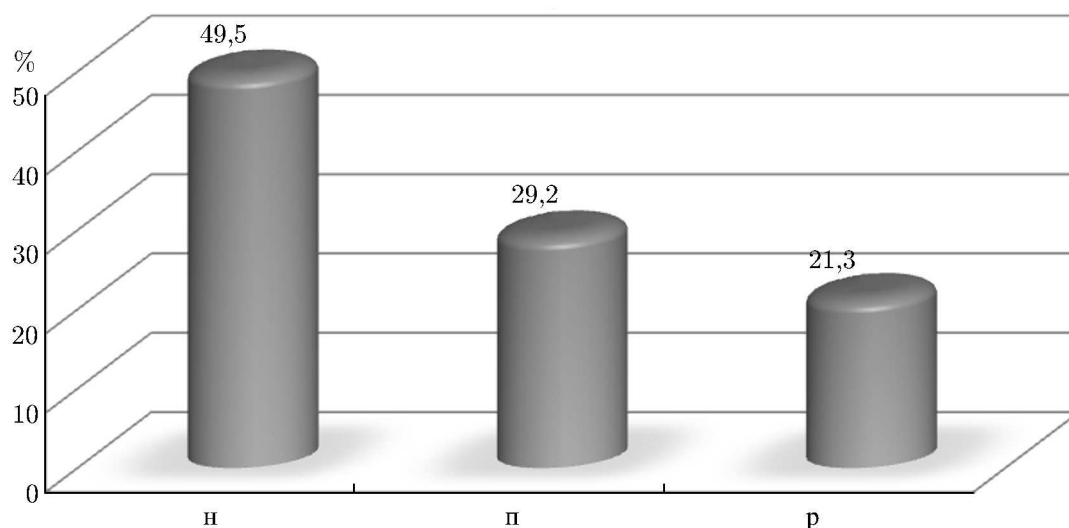


Рис. 4. Гистограмма количества спектров низкоамплитудных сигналов, соответствующих различным распределениям (р — рэлеевское, п — пуассоновское, н — нормальное, или гауссово)

3) Кросс-корреляция вейвлет-спектров записей различных временных периодов даёт связь во времени для различных частот, а для записей различных отведений позволяет определять области генерации различных частот в миокарде.

4) В данной работе был выбран вейвлет Морле, т. к. он является одним из наиболее распространённых и изученных на сегодня вейвлет-преобразований и даёт хорошее разрешение как во временной, так и в частотной областях [13].

5) Вейвлет Морле хорошо приспособлен для анализа квазипериодических процессов, поскольку имеет хорошую локализацию в частотном пространстве.

6) От преобразования Фурье (и других методов анализа) вейвлет-преобразование отличается тем, что операция умножения на «окно» содержится в самой базисной функции [13], при этом происходит адаптация «окна» к сигналу при изменении масштаба. Следовательно, при оценке значимости пиков (или максимумов в спектре) не нужно учитывать влияние частоты или периода.

7) Анализ спектров вейвлет-преобразований позволяет наблюдать эволюцию сигнала на протяжении выбранного нами отрезка электрокардиограммы, анализ модулей спектра (т. е. амплитудного спектра, в котором изменения вдоль оси времени отсутствуют) позволяет более точно, чем на самом спектре, выделить частоты с наибольшей амплитудой.

8) Кардиологам, привыкшим работать визуально с записями электрокардиограммы, удобнее работать с информацией в виде, приведённом на рис. 5 (по мнению кардиологов, работающих в нашей исследовательской группе).

Дополнительно отметим, что вейвлет Морле представляет собой гармоническое колебание, промодулированное функцией Гаусса [13, 14].

Аналитическое представление вейвлета Морле задаётся следующим выражением:

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-t^2/2) \exp(i\Omega t).$$

Необходимо отметить, что вейвлет Морле не удовлетворяет условию равенства нулю среднего и поэтому формально вейвлетом не является:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = \psi^*(0) = \exp(-\Omega^2/2) \neq 0.$$

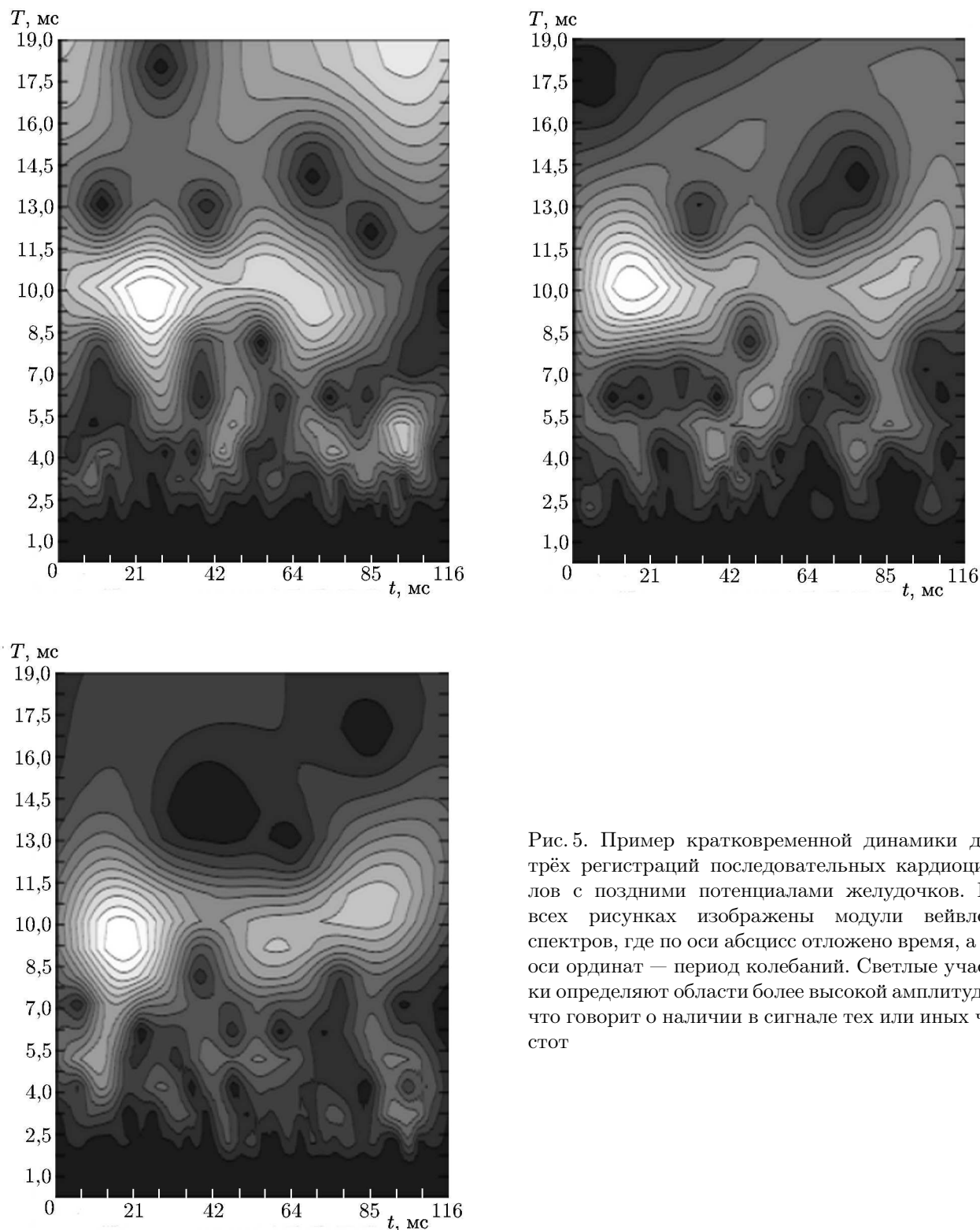


Рис. 5. Пример кратковременной динамики для трёх регистраций последовательных кардиоциклов с поздними потенциалами желудочков. На всех рисунках изображены модули вейвлет-спектров, где по оси абсцисс отложено время, а по оси ординат — период колебаний. Светлые участки определяют области более высокой амплитуды, что говорит о наличии в сигнале тех или иных частот

Тем не менее, величина $\exp(-\Omega^2/2)$, как правило, очень мала и при $\Omega = 2\pi$ имеет порядок 10^{-8} , поэтому функцию $\psi(t)$ с высокой точностью можно считать вейвлетом. Всем остальным требованиям вейвлет Морле удовлетворяет в полной мере.

Приведём основные результаты всего объёма анализируемого материала (более 15 000 электрокардиограмм). Для каждого сигнала вычислялись вейвлет-спектр и модуль комплексного спектра, т. е. амплитудный спектр, в котором изменения вдоль оси времени отсутствуют. Анализ вейвлет-спектров позволяет наблюдать эволюцию сигнала на протяжении выбранного нами отрезка времени регистрации, а анализ модулей вейвлет-спектров позволяет более точно, чем на самом спектре, выделять частоты с наибольшей амплитудой. Анализ наблюдаемых частот показал, что 46 % из них попадают в диапазон $55 \div 70$ Гц, а в диапазоне средних частот ($50 \div 90$ Гц) находятся 79 % всех выявленных частот. Остальные регистрируются как высокие ($90 \div 150$ Гц).

Приведём типичный пример так называемой кратковременной динамики, для исследования которой анализировались последовательно идущие в записи области с низкоамплитудными кардиосигналами (рис. 5). В данном примере (для трёх последовательных кардиоциклов) можно видеть, что некоторые из наблюдаемых частот присутствуют во всех приведённых спектрах, но в то же время можно видеть, что частотные картины для каждой отдельной области отличаются друг от друга по набору частотных составляющих. Эти различия могут проявляться в большей или меньшей степени, в зависимости от рассматриваемого конкретного случая, а данная методика позволяет отследить изменения, проявляющиеся в спектрах низкоамплитудных кардиосигналов. Отметим, что применяемые ранее методы, основанные на усреднении сигналов по $300 \div 500$ кардиоциклам [6, 7], не позволяют этого обнаружить.

5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, рассмотренные выше результаты анализа флуктуационной и квазипериодической составляющих низкоамплитудных кардиосигналов дают нам дополнительные характеристики (по сравнению с имеющимися ранее усреднёнными измерениями, опубликованными в работах [6, 7]) для предположений о механизмах формирования низкоамплитудных кардиосигналов. В частности, на наш взгляд, кажется проблематичным существование единого механизма образования высокочастотных компонент поздних потенциалов желудочков. Так, образование ишемизированных центров в миокарде [6, 7] должно было приводить к появлению дополнительных частот, но спектр не должен меняться в соседних кардиоциклах, что на самом деле и наблюдается в наших измерениях. Это означает, что необходимо проводить дополнительные исследования с учётом медицинских показаний и увеличивать количество данных для однородной группы пациентов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана перспективная методика анализа низкоамплитудных кардиосигналов без временного и пространственного усреднения, что позволяет избежать искажения компонент реального низкоамплитудного сигнала поздних потенциалов желудочков и получить более информативные данные о нём.

Впервые получены статистически надёжные количественные характеристики флуктуационной части низкоамплитудных кардиосигналов, позволяющие анализировать динамику и локализацию важных параметров записей. Результаты анализа показали с высокой статистической достоверностью нормальный закон распределения шумовых характеристик сигналов поздних потенциалов желудочков.

Впервые получены динамические характеристики (амплитуды и частоты) периодических и квазипериодических составляющих низкоамплитудных кардиосигналов без временного и пространственного усреднения. С использованием аппарата вейвлет-преобразований для исследова-

ния регистрации низкоамплитудных кардиосигналов получены распределения частот, не усреднённые по времени, как это было ранее [3–7]. Также появилась возможность определять область возникновения этих частотных составляющих низкоамплитудных кардиосигналов по записям в разных отведениях.

Результаты данной работы, а также учёт характеристик поздних потенциалов желудочков без временного и пространственного усреднения в совокупности с кардиологическими анализами пациентов позволят более полно исследовать природу поздних потенциалов желудочков и улучшить диагностику кардиозаболеваний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тептин Г. М., Кацевман М. М., Контуров С. В. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2001. № 4. С. 148.
2. Контуров С. В., Тептин Г. М., Ким З. Ф., Латфуллин И. А. // Вестник аритмологии. 1999. № 13. С. 54.
3. Simson M. B. // Circulation. 1981. No. 64. P. 235.
4. Бобров В. А. // Терапевтический архив. 1992. Т. 64, № 12. С. 116.
5. Verbarry E. I. // J. Electrocardiology. 1987. P. 125.
6. Латфуллин И. А., Ким З. Ф., Тептин Г. М. // Вестник аритмологии. 2008. № 53. С. 44.
7. Tep tin G. M., Latfullin I. A., Kim Z. F., Mamedova L. E. // Enviromental Radioecology Appl. Ecology. 2010. V. 16, No. 1. P. 3.
8. Ван дер Варден Б. Л. Математическая статистика. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 420 с.
9. Курганов Р. А. Ионосферное рассеяние радиоволн УКВ–КВ диапазона. Казань: Изд-во КГУ, 1992. 169 с.
10. Альперт Я. Л. Распространение радиоволн и ионосфера. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 169 с.
11. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1. М.: Наука, 1976. 494 с.
12. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. М.: Наука, 1978. 464 с.
13. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002. 448 с.
14. Астафьева Н. М. // Успехи физических наук. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145.

Поступила в редакцию 11 сентября 2010 г.; принята в печать 18 февраля 2011 г.

SOME CHARACTERESTICS OF LOW-AMPLITUDE CARDIAC SIGNALS

G. M. Tep tin, I. A. Latfullin, L. E. Mamedova, and Z. F. Kim

In this work, we present the results of experimental study of the low-amplitude cardiac signals without the temporal and spatial averaging. The characteristics of the fluctuational and quasi-periodic components of the low-amplitude signals are reliably statistically determined for the first time. The results of the studies of the periodic and quasi-periodic components obtained from the data of the long-term measurements are given. It is found that the structure of the frequency characteristics of low-amplitude signals has pronounced temporal variability in neighboring cardiac cycles.