

В. В. Головкин, Ю. К. Шлык, А. Д. Митянов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ СЕРДЦА С ЦЕЛЬЮ ВЫЯВЛЕНИЯ ЕГО ПАТОЛОГИЙ

Рассматривается метод частотно-временного анализа нестационарных акустических сигналов от сердца человека с использованием вейвлет-преобразования. Обработаны сигналы от здорового сердца и сердца с патологиями. Представлены шкалограммы результирующих данных, отмечены достоинства данного метода.

Вейвлет-преобразования, акустический сигнал, сердце, патология.

Сердце, как один из жизненно важных органов, с давних пор привлекает внимание ученых. Изучение механизмов его работы, взаимодействие с другими системами организма, причинно-следственные связи, вызывающие различные заболевания,— наиболее актуальные вопросы современной кардиологии. Заболевания сердечно-сосудистой системы (ССС) занимают первое место не только в России, но и в большинстве развитых стран мира. Поэтому диагностика и выявление кардиологических заболеваний на ранних стадиях имеет огромное значение.

Существуют разнообразные методы выявления заболеваний сердца и ССС. Наиболее распространены электрокардиография и исследование звуков сердца в связи с высокой эффективностью, безопасностью и простотой аппаратной реализации этих методов. Практически каждое лечебное учреждение имеет оборудование для проведения исследований деятельности ССС данными методами, однако для точной постановки диагноза необходимы комплексное исследование и опыт практикующего врача.

Среди методов диагностики и исследования деятельности ССС по акустическим сигналам, получаемым с поверхности тела человека, наибольшее распространение в медицине получили аускультация и фонокардиография. Оба метода имеют свои преимущества и недостатки, связанные с различной формой представления результатов, и могут дополнять друг друга.

Следует кратко рассмотреть физические основы этих методов для общего представления о целях выполняемых процедур. Аускультация сердца выполняется с помощью стетоскопа или стетофонендоскопа, позволяющих выделить высокочастотные компоненты сигнала и облегчить их выслушивание. Метод фонокардиографии заключается в графической регистрации акустических сигналов в определенных диапазонах частот и их дальнейшем анализе. Основной задачей аускультации и фонокардиографии является выделение энергетически слабых, но диагностически важных высокочастотных шумов сердца [6, 9]. Диагностика кардиологических заболеваний в обоих случаях производится изучением очередности и мощности тоновых и шумовых явлений, приведенных к уровню, доступному для исследования медицинским персоналом.

Фонокардиография как наиболее современный метод диагностики заболеваний сердца по акустическим сигналам исследует сигналы в диапазоне частот от 16 до 1000 Гц. При этом выделяются диапазоны, в которых произво-

дится запись сигналов: низкочастотный — (35 ± 10) Гц; среднечастотный первый — (70 ± 15) Гц; среднечастотный второй — (140 ± 25) Гц; высокочастотный — (250 ± 50) Гц [6]. Далее производится усиление слабых сигналов, одновременная регистрация в графическом виде и анализ полученных данных. В ходе исследования появляется возможность сравнить время появления и частоту акустических феноменов, обозначить причину их возникновения и выявить патологическую значимость.

Современное развитие науки и компьютерных технологий позволяет не ограничиваться анализом звуковых явлений в заданных частотных диапазонах и регистрацией их в виде амплитудно-временной зависимости. На сегодняшний день имеются мощные математические средства и вычислительные алгоритмы для анализа сигналов в частотной и частотно-временной области. Одним из таких средств, получившим широкое распространение и имеющим огромную практическую значимость, является вейвлет-преобразование (ВП) [1, 4].

Вейвлетами называют семейство функций, локальных во времени и по частоте и получаемых из одной функции путем ее сдвига и растяжения по оси времени. ВП позволяет представить обрабатываемый временной сигнал в виде его соответствия семейству вейвлет-функций. Широкое распространение ВП получило благодаря своим уникальным свойствам, позволяющим исследовать особенности сигналов не только в частотном, но и во временном диапазоне [1, 3–5]. Данное преобразование широко используется при изучении нестационарных сигналов, изменяющих свой частотный диапазон с течением времени.

Однако, хорошая временная локализация — не единственное преимущество вейвлетов. В отличие от «оконого» преобразования Фурье (ОПФ), также имеющего свойства локальности по времени, ВП обладает свойством масштабирования. Принцип неопределенности Гейзенберга не позволяет одновременно точно определить временные и частотные характеристики сигнала. Данный принцип выявляет «проблему разрешения» при частотно-временном представлении сигнала. Применяя ОПФ, мы локализуем сигнал во времени, теряя точность представления сигнала в частотном диапазоне [3, 5].

Вейвлет-преобразование также подчиняется принципу неопределенности Гейзенберга, но обладает свойствами многомасштабности. ВП имеет хорошее разрешение по времени и плохое по частоте на высоких частотах и плохое разрешение по времени и хорошее по частоте на низких частотах. Это позволяет использовать эффективное окно во всем частотно-временном диапазоне. Таким образом, для низкочастотных компонентов сигнала, имеющих большую длину волны, мы можем точно определить частотный состав, а для высокочастотных компонентов, как правило, характеризующих кратковременные всплески и особенности сигнала, более точно определить время появления. Следует отметить, что большинство реальных сигналов обладают как раз такими свойствами, а именно имеют плавно изменяющиеся низкочастотные компоненты с наложением высокочастотных особенностей, появляющихся локально во времени.

Не является исключением и акустический сигнал от сердца. Звуковые колебания, возникающие при работе сердца, появляются вследствие его периодического сокращения, выталкивания крови, работы клапанного аппарата, вибрации стенок кровеносных сосудов. Все эти явления возникают в определенные моменты времени, постепенно затухая и появляясь вновь. Акустический сигнал работающего сердца не стационарен. Он обладает основными низкочастотными характеристиками — тонами и высокочастотными характеристиками — шумами, появляющимися при различных заболеваниях. По этой

причине применение вейвлет-преобразования для обработки звуковых сигналов от сердца является перспективным направлением исследований.

В качестве инструмента для проведения вейвлет-анализа мы использовали программный пакет LabView фирмы National Instruments. Данный продукт имеет прикладную направленность, позволяя получать результаты научных и инженерных исследований, не вдаваясь в особенности программирования. Создание исполняемой программы представляет собой выбор необходимых компонент и соединение их между собой в зависимости от поставленных целей [2, 7].

Для решения поставленной задачи был специально разработан программный модуль с использованием ресурсов LabView, позволяющий выполнить необходимую в данном случае последовательность операций: извлечение информации из файлов, обработку сигнала с применением вейвлет-преобразования и регистрацию полученных данных на шкалограмме и трехмерном рисунке [7, 8]. Блок-схема разработанной программы представлена на рис. 1.

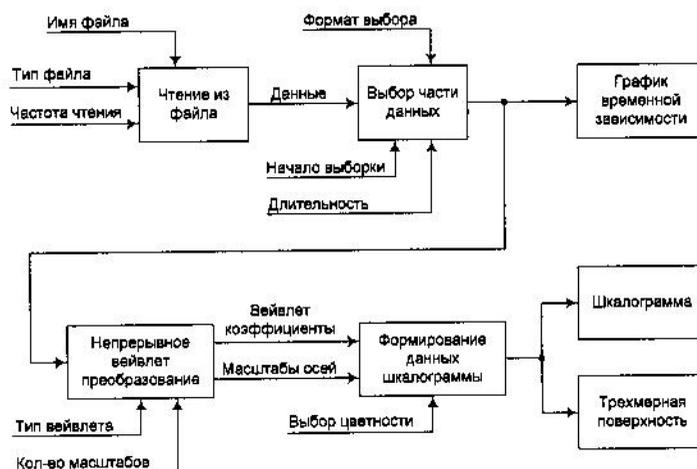


Рис. 1. Блок-схема программы вейвлет-анализа акустического сигнала

В качестве материала для математической обработки с помощью заданного алгоритма мы выбрали реальные акустические характеристики сердца человека, полученные с сайта университета Вашингтона (США) [10]. Данные акустические сигналы используются для обучения медицинского персонала методам аускультации сердца и содержат информацию, полученную от пациентов с различными заболеваниями. В качестве наглядного примера были выбраны записи звука нормальной работы сердца и сигналы, возникающие при митральном стенозе и аортальной недостаточности. Так как эти виды патологий являются серьезными нарушениями в работе ССС и в частности сердца, обработка сигналов полученных при этих заболеваниях позволит наглядно рассмотреть возможности применения вейвлетов для анализа данных.

В качестве материнского вейвлета для обработки временных сигналов был выбран один из наиболее распространенных — «мексиканская шляпа» [1, 3, 4]. Полученные результаты приведены к виду, наиболее качественно отражающему возможности масштабного-временного анализа. В верхней части рис. 2–4 расположены временные зависимости исследуемых характеристик, в середине расположены шкалограммы, отражающие результаты вейвлет-преобразования. Необходимо отметить, что результаты вейвлет-обработки пред-

ставляются в виде амплитудной зависимости сигналов, отображаемых цветом на плоскости «масштаб (scale) — время (time)». При этом малые масштабы соответствуют высоким частотам, а большие — низким. Для большей наглядности в нижней части каждого рисунка представлена трехмерная поверхность, отражающая данные шкалограммы для одного сокращения сердца. Трехмерные рисунки позволяют подробнее рассмотреть особенности полученных данных.

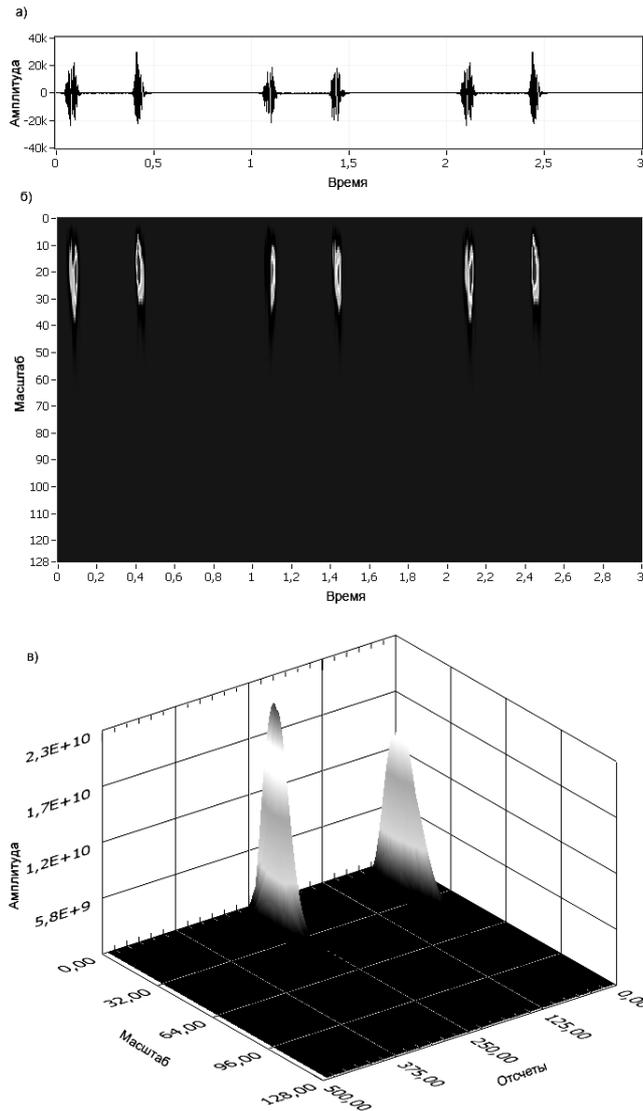


Рис. 2. Результаты обработки акустического сигнала нормальной работы сердца:
 а — временная зависимость; б — шкалограмма вейвлет-преобразования;
 в — трехмерный рисунок вейвлет-преобразования для одного сокращения сердца

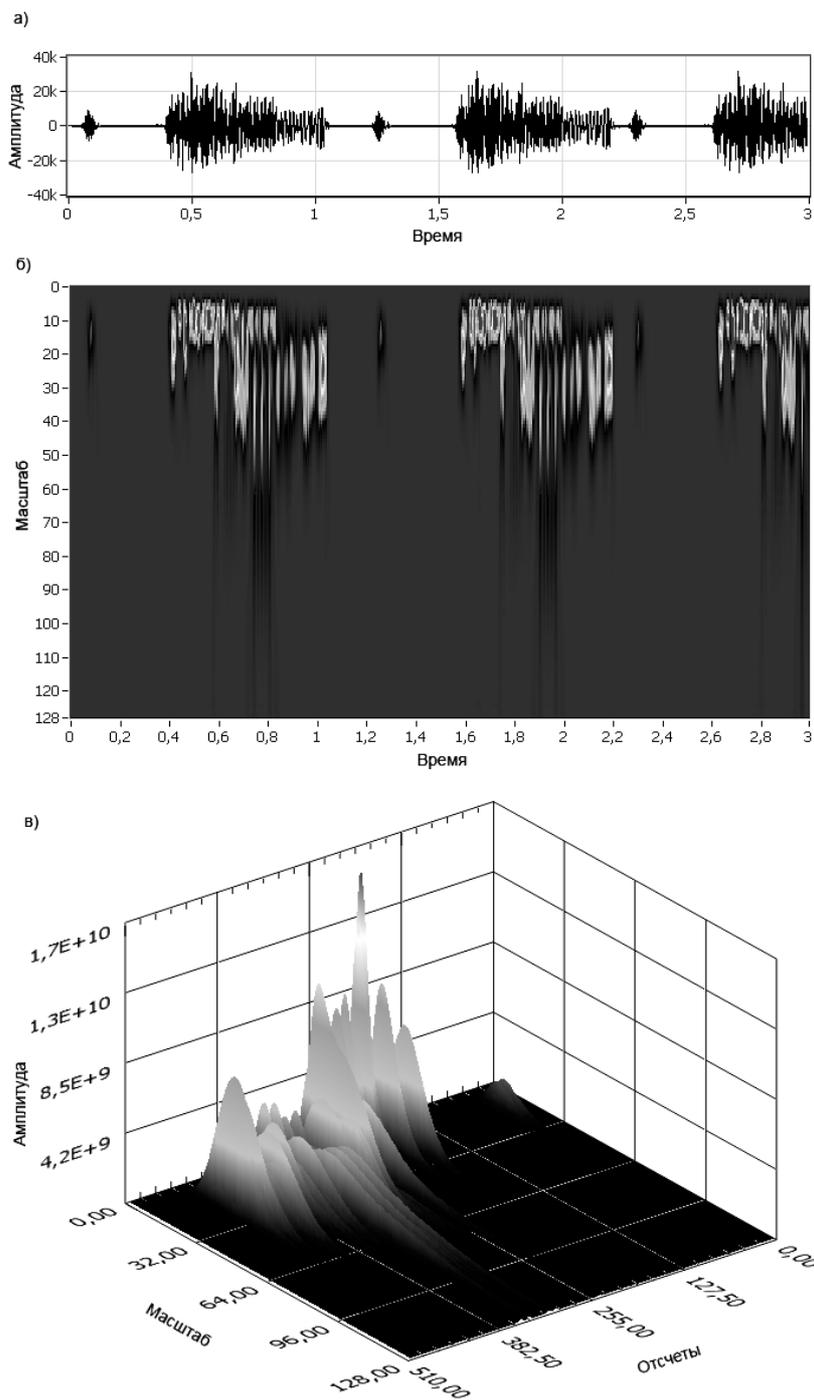


Рис. 3. Результаты обработки акустического сигнала работы сердца при аортальной недостаточности:
а — временная зависимость; б — шкалограмма вейвлет-преобразования;
в — трехмерный рисунок вейвлет-преобразования для одного сокращения сердца

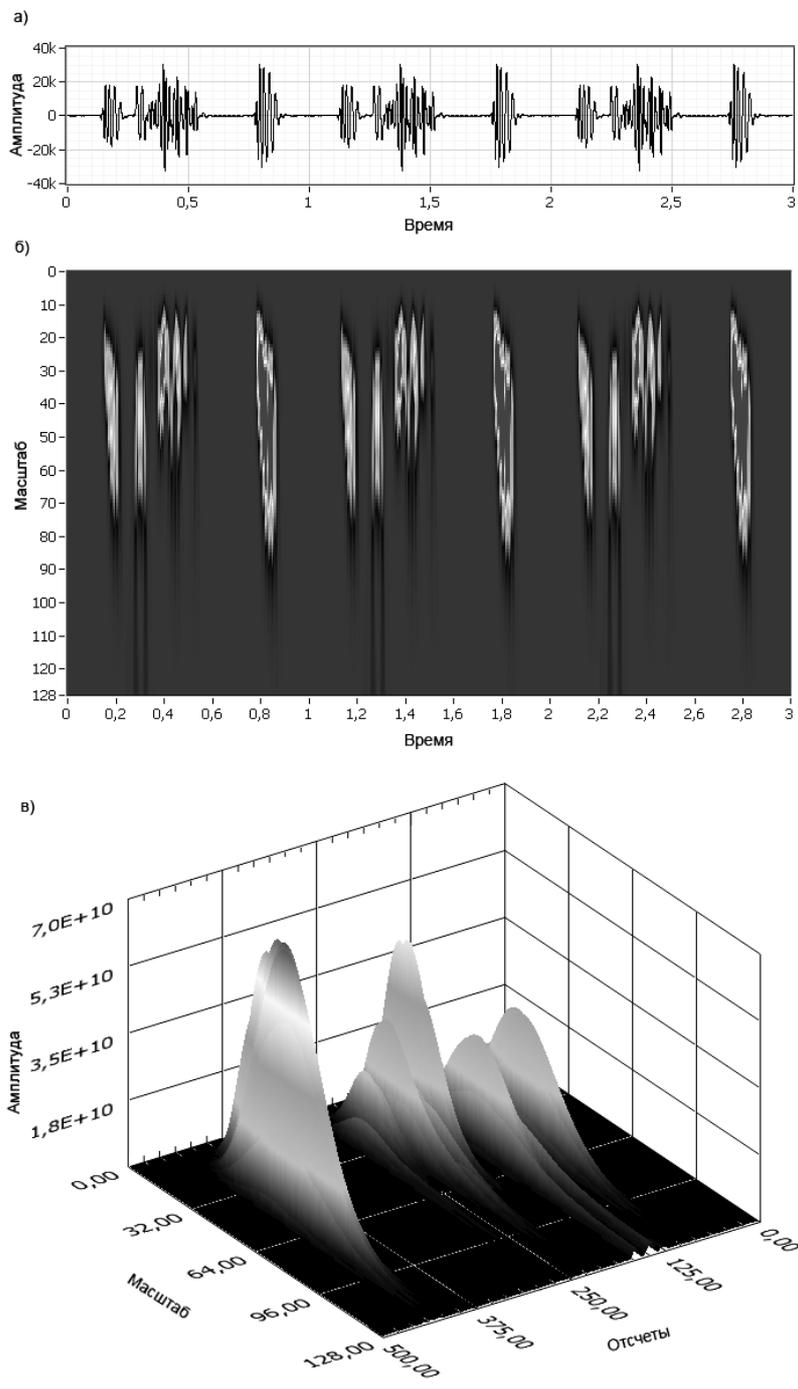


Рис. 4. Результаты обработки акустического сигнала работы сердца при митральном стенозе:
 а — временная зависимость; б — шкалограмма вейвлет-преобразования;
 в — трехмерный рисунок вейвлет-преобразования для одного сокращения сердца

Представленные на рисунках шкалограммы позволяют наблюдать изменение частотной составляющей сигнала с течением времени. Из полученных изображений можно получить подтверждение о нестационарности сигналов. Можно наблюдать периодическое возникновение и затухание тоновых и шумовых компонентов, соответствующее ритму работы сердца. При этом сигналы с патологиями содержат дополнительные, отсутствующие в нормальном сигнале компоненты, которые могут характеризовать тяжесть и вид заболевания [6]. При патологиях мы можем наблюдать, что участки сердечно-сосудистой системы, пораженные заболеваниями, проявляются на шкалограмме и издадут акустические колебания определенного частотного диапазона в определенные моменты времени. Следует отметить, что на представленных рисунках частотный диапазон таких феноменов значительно отличается от диапазона нормального сигнала.

Опишем подробнее полученные результаты. Рис. 2, соответствующий нормальной работе сердца, содержит периодически возникающие компоненты, имеющие одну основную частоту (проявляющиеся в одном масштабе). Как следует из рис. 3, для аортальной недостаточности можно уверенно выделить диапазоны частот в масштабе 10 и 30, которые к тому же накладываются друг на друга во времени, что может служить одним из вероятных признаков существования данного вида патологий. На данном рисунке видно, что по временной характеристике невозможно определить изменение частотных составляющих сигнала с течением времени, тогда как на шкалограмме эти данные хорошо наблюдаемы. На рис. 4 явно выражены хорошо локализованные во времени очаги возбуждения звуковых явлений, которые сопровождаются сужением их частотного диапазона.

Следует отметить, что на рассмотренных рисунках можно наблюдать постоянное изменение частотного состава сигналов с течением времени. Звуковые явления, сопровождающие различные виды патологий, соответствуют «нездоровым» движениям клапанов сердца, крови, стенок кровеносных сосудов и т. д. Каждое возникающее резонансное явление, приводящее к появлению шума, отражает информацию о соответствующем нарушении в процессе сокращения сердца и работы ССС [6, 9].

Таким образом, выполненный анализ позволяет утверждать, что выбранное вейвлет-преобразование является наиболее подходящим математическим аппаратом для обработки акустических сигналов ССС. Применение вейвлет-преобразования увеличивает количество диагностически важной информации, выявляя те особенности сигналов, которые не могут быть зарегистрированы такими методами, как аускультация и фонокардиография.

Более того, метод позволяет представить звуковые явления, возникающие при работе сердца, в форме, более удобной для комплексного анализа этих сигналов средствами вычислительной техники, что позволит создать виртуальную модель акустического портрета ССС человека.

Предложенный метод обработки может быть использован для определения типа патологии, оценки текущей стадии заболевания и прогнозирования изменения состояния пациента в ходе лечения и диспансеризации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. — 1996. — Т. 166, № 11. — С. 1145–1170.

2. Батоврин В. К., Бессонов А. С., Мошкин В. В., Папуловский В. Ф. LabVIEW: практикум по основам измерительных технологий: Учеб. пособие для вузов. — М.: ДМК Пресс, 2005. — 208 с.
3. Блаттер К. Вейвлет-анализ. — М.: Техносфера, 2004. — 280 с.
4. Дремин И. М., Иванов О. В., Нечитайло В. А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. — 2001. — Т. 171, № 5. — С. 465–501.
5. Короновский А. А., Храмов А. Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. — М.: Физматлит, 2003. — 176 с.
6. Минкин Р. Б., Павлов Ю. Д. Электрокардиография и фонокардиография. — Л.: Медицина, 1980. — 200 с.
7. Суранов А. Я. LabView 8.20: Справочник по функциям. — М.: ДМК Пресс, 2007. — 536 с.
8. Тревис Дж. LabVIEW для всех / Пер. с англ. Н. А. Клушин. — М.: ДМК Пресс: ПриборКомплект, 2005.
9. Юлдашев К. Ю., Хайдаров Т. С., Кушаков В. И. Краткое пособие по электро- и фонокардиографии. — Ташкент: Медицина, 1984. — 191 с.
10. Сайт университета Вашингтона <http://depts.washington.edu/physdx/>.

V. V. Golovkin, Yu. K. Shlyk, A. D. Mityanov

USE OF TRANSFORMATION WAVELET FOR PROCESSING NON-STATIONARY ACOUSTIC HEART SIGNALS WITH A VIEW TO REVEAL ITS PATHOLOGIES

The article considers a method of frequency and temporal analysis of non-stationary acoustic signals from man's heart, using transformation wavelet. Subject to processing being signals from strong heart, together with those with pathologies. The authors present resultant data scales, marking advantages of the given method.

Transformation wavelet, acoustic signal, heart, pathology.