

МАСШТАБНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ С БАЗИСНОЙ ФУНКЦИЕЙ ДОБЕШИ

К.Г. ПОЛОВЕНКО

Масштабное представление сигналов лежит в основе многих применений вейвлет-преобразований. Для детальной расшифровки электроэнцефалограмм с целью определения аномальных участков на ЭЭГ человека было разработано программное средство, которое осуществляет масштабный анализ с базисной функцией Добеши, на основе вейвлет-преобразований. Данный вид анализа состоит в осуществлении декомпозиции сигналов представление сигнала путем разложения на коэффициенты аппроксимации и детализации. Это дает возможность получить подробное представление скрытых участков, которые несут высокую информативность для выявления аномалий.

Ключевые слова: электроэнцефалограмма, масштабный анализ, базисная функция Добеши, прямое дискретное преобразование, обратное дискретное преобразование.

ВВЕДЕНИЕ

Для обработки нестационарных сигналов традиционный анализ с помощью преобразования Фурье имеет ограниченную информативность и не дает представление об его локальных свойствах при быстрых временных изменениях спектрального состава.

В тоже время, вейвлет-преобразование способно предоставить двумерную развертку исследуемого одномерного сигнала, при этом его частота и координата рассматриваются как независимые переменные.

Вейвлет-преобразование представляет собой разложение сигнала по специальному базису, состоящему из некоторых функций. Для построения базиса используется функция, которая называется материнским вейвлетом [1, 2]. Эта материнская функция образуется с помощью сдвига и масштабирования (сжатие и растяжение) одной функции порождающего вейвлета. Каждому значению масштаба вейвлета соответствует бесконечное количество сдвинутых друг относительно друга локализованных в пространстве функций [4]. Материнский вейвлет выбирается так, чтобы служить прототипом всех окон в процессе вычисления. Все окна – это расширенные (или сжатые) и смещенные версии материнского вейвлета.

Применение вейвлет-преобразования позволяет существенно расширить возможности цифровой обработки случайных сигналов, создавать эффективные алгоритмы сжатия и шумоочистки сигналов. Одна из основополагающих идей вейвлет-представления сигналов заключается в разбивке приближения к сигналу на две составляющие – грубую (аппроксимирующую) и уточненную (детализирующую) – с последующим их дроблением с целью изменения уровня декомпозиции сигнала. Для анализа ЭЭГ-сигнала необходимо рассчитать его грубые значения и детализирующие коэффициенты. Наиболее подходящим для этих целей является вейвлет Добеши. Материнский вейвлет Добеши – это непрерывная функция, не тождественная нулю и недифференцируемая на конечном отрезке. Вейвлет До-

беши является ортогональным вейвлетом, главным свойством которого является возможность точной реконструкции сигналов произвольного вида. Область задания вейвлетов Добеши шире, чем у вейвлетов Хаара. При этом имеется большее количество малозначимых коэффициентов разложения и, при отбрасывании которых, возможно более сильное сжатие данных. Осуществляя композицию сигнала, можно точно восстановить его значение, используя грубый аппроксимирующий коэффициент и ряд детализирующих коэффициентов [10]. Это служит основой для масштабного метода обработки сигналов [5].

В результате, появляется возможность анализировать свойства сигнала, одновременно, в физическом (время, координата) и в частотном пространствах.

Целью работы является автоматизация процесса обработки ЭЭГ и выявления их информативных участков.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить задачу разработки программного продукта, который выполняет масштабный анализ ЭЭГ человека на основе вейвлет-преобразований с помощью детального разложения ЭЭГ-сигнала по определенному базису.

1. АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для разработки автоматизированного программного средства для анализа ЭЭГ использовались отдельные компоненты среды MATLAB и среда Delphi.

В данной работе для детальной расшифровки ЭЭГ использовался масштабный анализ с базисной функцией Добеши, на основе вейвлет-преобразований. Базисная функция Добеши хорошо представлена в универсальном пакете MATLAB. Система MATLAB является интерактивной системой для выполнения инженерных и научных расчетов, ориентированной на работу с массивами данных.

Практическое использование вейвлет-преобразования значительно облегчилось с появлением

нием в программной среде MATLAB, начиная с версии 5.1, пакета программ wavelet toolbox [12]. Весьма полезным инструментом для работы с wavelet в MATLAB является графическая оболочка WAVEMENU, описание которой на русском языке можно найти в [13,14]. При помощи средства GUI, можно получить удобный и наглядный доступ к основным процедурам toolbox Wavelet — Wavemenu, что представляет собой набор подпрограмм, для решения разнообразных инженерных задач, связанных с компрессией сигналов, анализом их особенностей, очисткой от шумов и др. В основе используемых процедур лежит теория разложения сигналов по специальным функциям — wavelet, главные особенности функций разложения — ограниченность во времени, самоподобие и компактная локализация энергии сигнала по времени и частоте. Одной из подпрограмм является команда wavedemo [11]. С помощью функции *apprcoef2* вычисляются коэффициенты аппроксимации исследуемого сигнала (грубое приближение сигнала), а при помощи функции *detcoef2* детализирующие коэффициенты (детальное представление сигнала) его уровней. Представление сигнала путем разложения на эти коэффициенты называется декомпозицией уровня сигнала. Исходный сигнал считается сигналом с нулевым уровнем декомпозиции [10]. Пакет Wavelet Toolbox достаточно обширный, а при декомпозиции сигнала используются лишь некоторые функции. Поэтому следует использовать отдельные компоненты для автоматической обработки ЭЭГ-сигналов, чтобы осуществить декомпозицию характерных областей для выявления аномалий. Эти компоненты целесообразно было бы внедрить в программном продукте, реализованном на языке программирования Delphi 7.0.

2. СУТЬ МЕТОДА МАСШТАБНОГО АНАЛИЗА ЭЭГ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ С БАЗИСНОЙ ФУНКЦИЕЙ ДОБЕШИ

Масштабное представление сигналов лежит в основе многих применений вейвлет-преобразований. Масштаб, который используется при вейвлет-преобразовании, похож на тот, который применяется в картографии. Как и на карте, крупный масштаб соответствует глобальному обзору сигнала, а малый масштаб — подробному. Подобно этому, в терминах частоты, низкая частота (крупный масштаб) соответствует общей информации о сигнале (обычно охватывает весь сигнал), в то время как высокая частота (мелкий масштаб) соответствует подробной информации о скрытых особенностях сигнала. Масштабирование, как математическая операция, растягивает либо сжимает сигнал. Крупный масштаб соответствует растянутому сигналу, а более мелкий — сжатому. На языке функций, по заданной функции $f(t)$ можно построить функцию $f(at)$, являющуюся сжатой версией исходной при $a > 1$, и растянутой версией $f(t)$ при $a < 1$. Однако, в определении вейвлет-преобразования масштаб стоит в знаменателе, поэ-

тому выполняется обратное преобразование, т.е. $a > 1$ растягивает сигнал, $a < 1$ — сжимает [11].

Декомпозиция является собой многочисленное разложение исходного сигнала как вычисление по алгоритму пакетного вейвлет-дерева для выбора оптимальной детализации.

Предлагается на каждом уровне вейвлет-дерева проводить определение среднего уровня сигнала, длительности, периодичности. После этого следует провести сравнение средней амплитуды с амплитудным значением исходного сигнала в каждый момент времени. Если мгновенное значение будет превышать в 3-4 раза среднее значение, то такое мгновенное может быть идентифицировано как спайк (всплеск). В результате такого анализа можно обнаружить наличие спаиков.

Аналогичным образом следует провести сравнение длительности и периодичности сигнала. Детализация сигнала проводится на нескольких уровнях. Если на начальных уровнях декомпозиции не были обнаружены спаики, то на 6-м, если они присутствуют, их выявить можно обязательно. Определение уровня разложения, на каком будут выявлены аномальные области, будет называться глубиной разложения. После этого нужно задать структуру разложения, то есть выбрать тип детализации. Таким образом, процесс декомпозиции сигнала с использованием вейвлетов Добеши включает в себя такие общие операции: задание исходного сигнала и порядка вейвлета, определение глубины разложения, выполнение структуры разложения, удаление шума с использованием вейвлет-преобразований и восстановление сигнала.

Разработка программного средства для автоматического анализа ЭЭГ проводилась на языке программирования Delphi 7.0. Для того, чтобы детализировать ЭЭГ-сигналы с помощью разработанного программного средства, необходимо, прежде всего, обеспечить преобразование сигналов без потери информации. Предлагаемый алгоритм состоит в следующем. Сначала необходимо задать длину исходного сигнала и порядок вейвлета для восстановления данных. Входными данными является структура (тип) разложения, а выходными вектор реконструирования (объединение грубой и детальной компонент) сигнала. Дополнительно следует проводить проверку корректности данных — соответствие длины выборки указанному значению порядка. Далее следует выполнить удаление шума из сигнала с использованием вейвлет-преобразований. Идея удаления шума из сигнала базируется на определении некоторого порога и вычитания его из коэффициентов вейвлет-преобразования сигнала. Очистка сигнала от шума происходит в соответствии с заданными ранее параметрами (структура разложения, порядок базисной функции, заданный уровень декомпозиции). После этого очищенный от шума сигнал накладывается на исходный, чтобы проверить правильность выполнения декомпозиции. Далее строятся графики вейвлет-коэффициентов исходного и очищенного (синтезированного) сигнала. Затем следует получить возвращаемое

программой значение — это структура, содержащая значения коэффициентов детализации на всех уровнях разложения, и коэффициентов аппроксимации на последнем уровне разложения. Другими словами, по этим коэффициентам аппроксимации на указанном уровне можно восстановить исходный сигнал. Далее для сжатия и растяжения сигнала необходимо выполнить прямое дискретное вейвлет-преобразование. Дискретное вейвлет-преобразование наиболее эффективно в задачах сжатия сигналов и изображений, в задаче очистки сигнала от шумов. Это включает в себя следующие операции:

- на входе имеется исходный сигнал и отчеты квадратурно-зеркальных фильтров (КЗФ), а на выходе — коэффициенты разложения (аппроксимации и детализации). Длина векторов коэффициентов разложения равна половине длины исходного вектора. Если (КЗФ) фильтр не указан, то выполняется, по умолчанию, преобразование Хаара, которое является условием грубого представления сигналов. Это, пожалуй, самый простой вейвлет, имеющий свойства ортогональности и симметричности;

- выполняется вычисление длины сигнала и фильтра;

- рассчитывается длина буфера;

- контролируется соответствие длины сигнала и фильтра, а потом выделение памяти под буфер;

- копируется сигнал в буфер и происходит дополнение его до четной длины (длина сигнала соответствует длине фильтра в буфере). Сохраняется привязка выходных массивов на случай, если один из них используется как входной. После этого выходные указатели сбрасываются, чтобы изменение их длины не повлияло на входные данные.

Одним из важных этапов проверки правильности проведенных преобразований является выполнение обратного дискретного вейвлет-преобразования. На входе сигнала используются отчеты КЗФ и коэффициенты разложения (аппроксимации и детализации), а на выходе — синтезированный сигнал. По умолчанию длина векторов коэффициентов разложения равна половине длины исходного вектора. Если сигнал должен иметь нечеткую длину, то необходимо установить значение длины вектора. Если фильтр (КЗФ) не указан, то, по умолчанию, выполняется преобразование Хаара. Потом подсчитывается количество коэффициентов аппроксимации и детализации, чтобы определить количество уровней декомпозиции. Нулевые коэффициенты могут быть упущены. Чтобы определить длину периодического дополнения и векторов коэффициентов, нужно заполнить сначала вектор коэффициентов аппроксимации, а потом вектор коэффициентов детализации. Устанавливается длина результирующего вектора (всегда четная по условию). Если вектор должен иметь нечетную длину, он обрезается вне функции. Таким образом вычисляется свертка коэффициентов разложения и КЗФ.

В диалоговом окне программного средства

следует выводить графическое отображение результатов масштабного метода обработки сигналов. Если проведенное восстановление сигнала позволило получить исходный сигнал, то значит декомпозиция выполнена, верно, и теперь следует сохранить результаты этой декомпозиции, которые дают возможность выявления информативных участков сигналов. Предложенный алгоритм анализа сигналов представлен на рис. 1. Данный алгоритм осуществляет разложение сигнала на определенный сдвиг (по условию вейвлет-преобразования), чем меньше сдвиг, тем площадь преобразования больше, что дает больше информации для качественной обработки сигнала.

И так, после ввода сигнала производится его разложение с использованием вейвлета Добеши с 3-го нулевого уровня до 6-го уровня. Максимальное число уровней ограничено длиной сигнала. Результат разложения отображается двумерной картой. Более наглядный результат разложения можно оценить по декомпозиции сигнала. Каждый элемент декомпозиции определяет вклад соответствующего уровня разложения в исходный сигнал.

Из выше всего сказанного, можно сделать вывод, что предложенный алгоритм программного продукта дает возможность качественно провести анализ случайных сигналов, таких как ЭЭГ, получить подробное представление скрытых участков, которые несут высокую информативность для выявления аномалий с последующим прогнозированием той или иной патологии.

3. ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА

Традиционный анализ случайных биосигналов различными методами является собой трудоемкий процесс и не дает возможности качественного выявления характерных областей для диагностирования каких-либо патологий. Разработанное программное средство дает возможность провести автоматизированную и точную обработку нестационарных участков сигналов. С помощью данного программного продукта для двух разных людей, имеющих различные диагнозы, были получены результаты обработки электроэнцефалограмм. Для начала были определены характерные участки сигналов для дальнейшего анализа. Затем исследовались результаты в соответствии с изменением уровня декомпозиции и порядка функции Добеши.

На рис. 2-10 показаны результаты обработки ЭЭГ-сигналов с помощью программного продукта «Масштабный анализ по Добеши» при 3-м, 4-м, 5-м и 6-м порядках уровня декомпозиции и материнской функции. На рис. 2 представлен исходный сигнал ЭЭГ условно здорового человека, так как отсутствует какая-либо аномалия, а имеющийся выброс находится в пределах нормы.

На рис. 3-5 показаны результаты работы масштабного анализа программы при обработке нормальной ЭЭГ.

На рис. 6-10 показаны явно выраженные аномальные участки, характеризующие патологическую активность коры головного мозга чело-

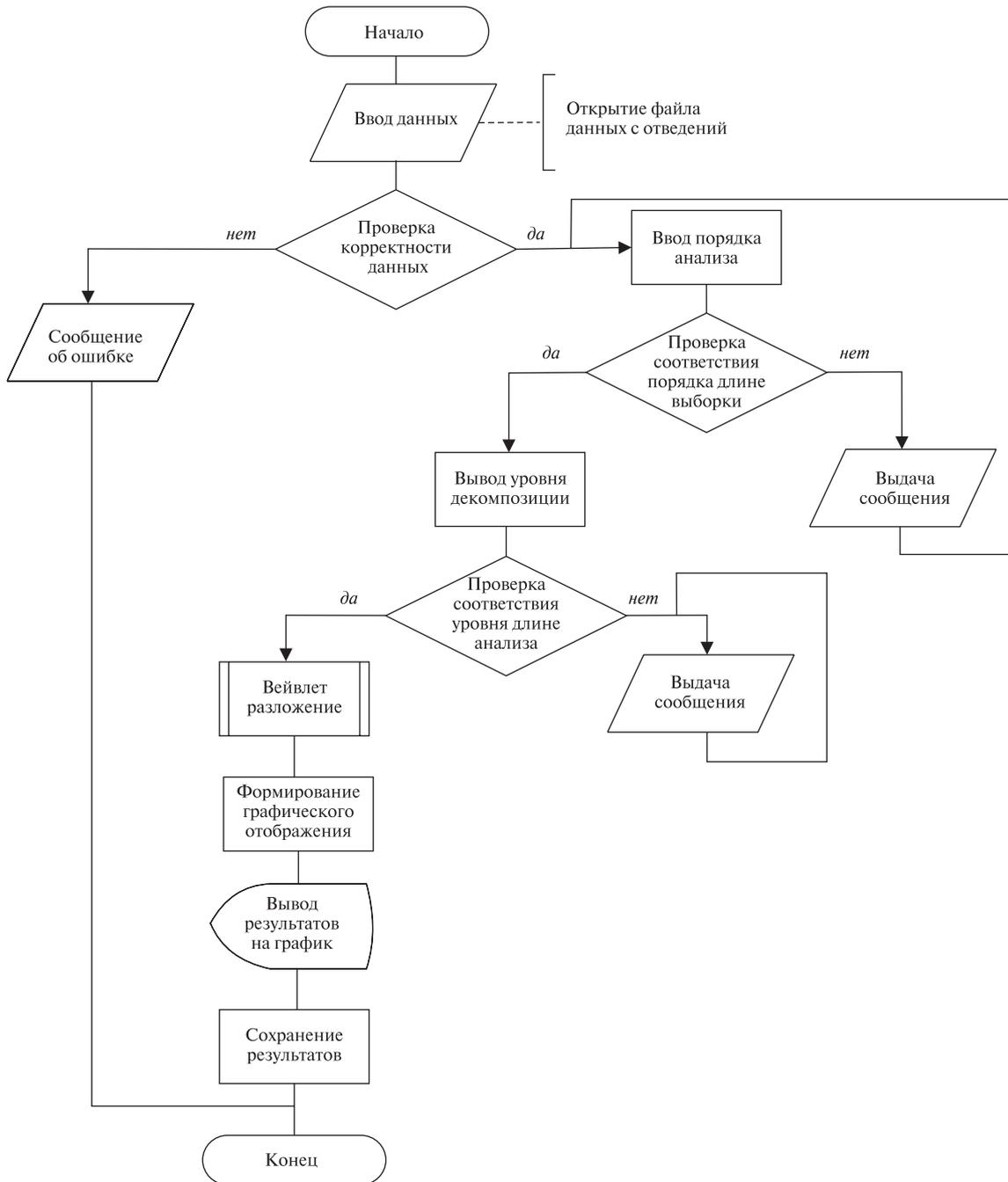


Рис. 1. Схема программы «Масштабный анализ по Добеши»

века. Выбросы на рис. 6-10 имеют амплитуду, намного превышающую нормы ЭЭГ-сигнала. При увеличении порядка базисной функции и уровня декомпозиции можно подробно рассмотреть изменение сигнала во времени и выделить характерные особенности аномальных участков.

Максимальный уровень разложения – 6-й, не имеет большого преимущества перед 5-м, поэтому достаточно подробно рассмотреть сигнал до шестого уровня декомпозиции. Это дало возможность получить точные выходные данные, что повышает надежность, информативность результатов для заключения о наличии той или иной аномалии.

Наилучшие результаты по выявлению характерных участков ЭЭГ-сигналов достигаются

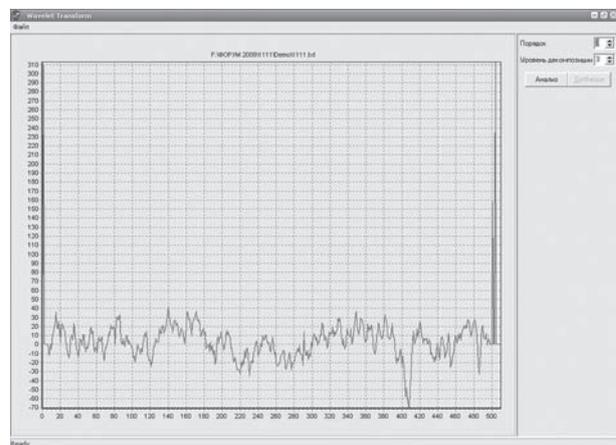


Рис. 2. Исходный ЭЭГ-сигнал здорового человека с отведения Т4_1

при использовании вейвлета Добеши порядка 6 и уровня декомпозиции 6 (рис.10), что не позволит ошибиться о выявлении той или иной аномалии, если они присутствуют.

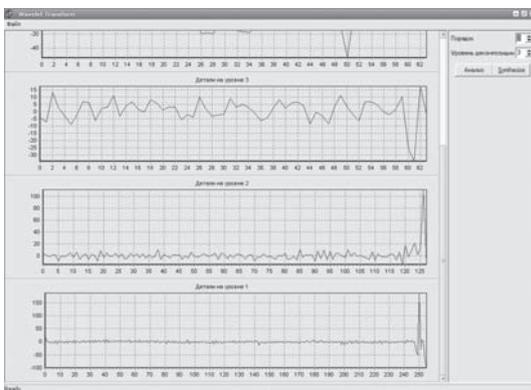
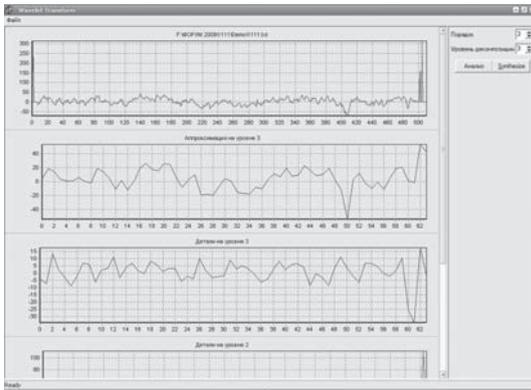


Рис. 3. Разложение сигнала нормальной ЭЭГ масштабным анализом. Порядок базисной функции Добеши 3, уровень декомпозиции 3

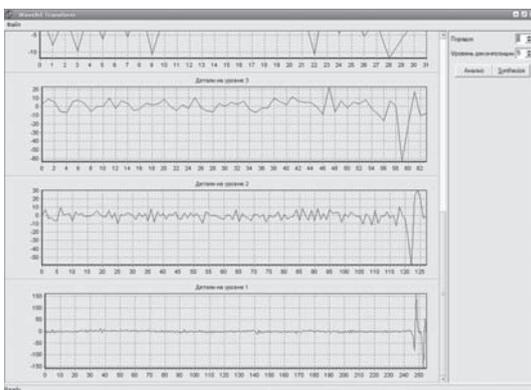
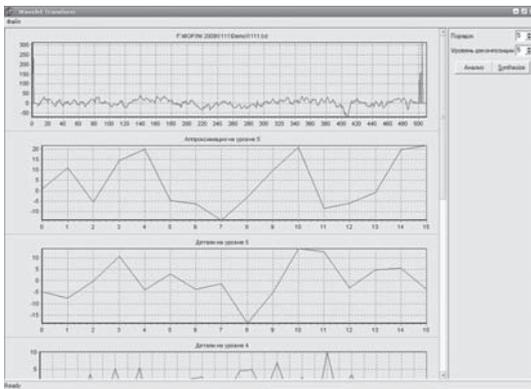


Рис. 4. Разложение сигнала нормальной ЭЭГ масштабным анализом. Порядок базисной функции Добеши 5, уровень декомпозиции 5

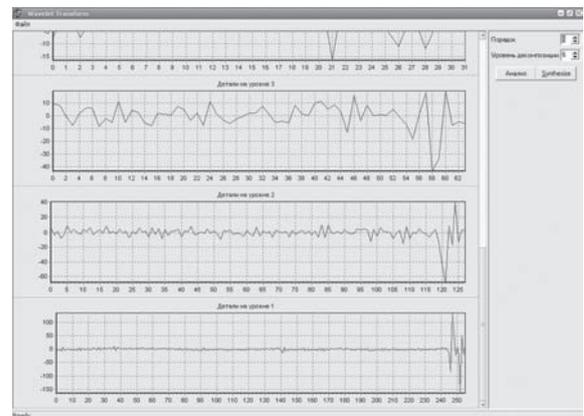
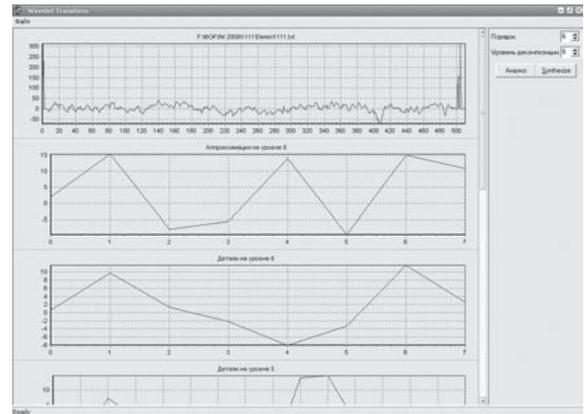
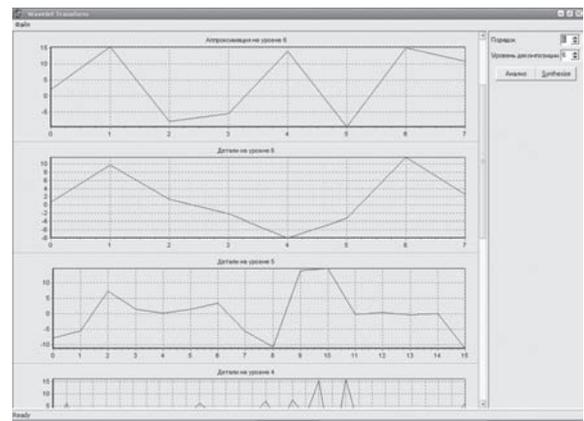


Рис. 5. Разложение сигнала нормальной ЭЭГ масштабным анализом. Порядок базисной функции Добеши 6, уровень декомпозиции 6

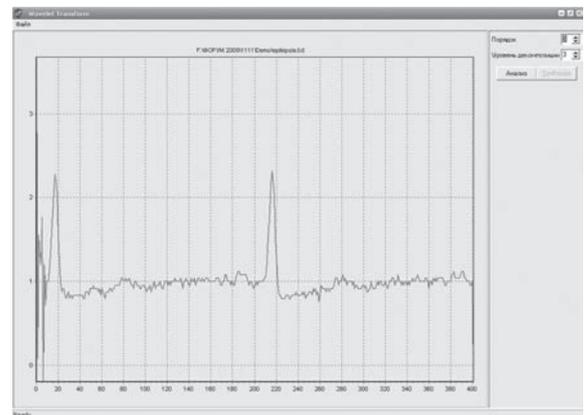


Рис. 6. Электроэнцефалограмма пациента, больного эпилепсией, снятой с отведения Т4_1

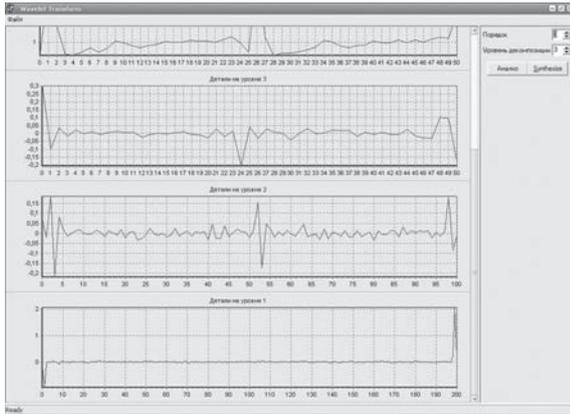
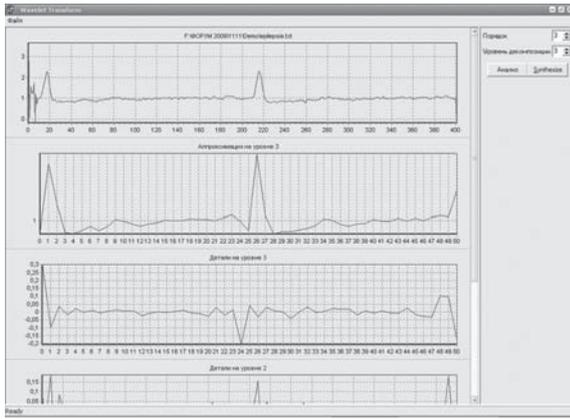


Рис. 7. Разложение сигнала масштабным анализом эпилептической ЭЭГ. Порядок Добеши 3, уровень декомпозиции 3

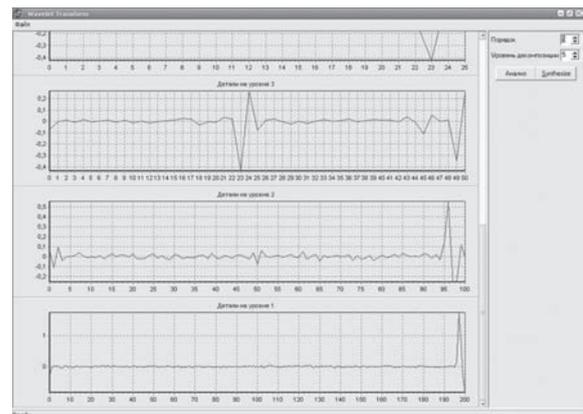
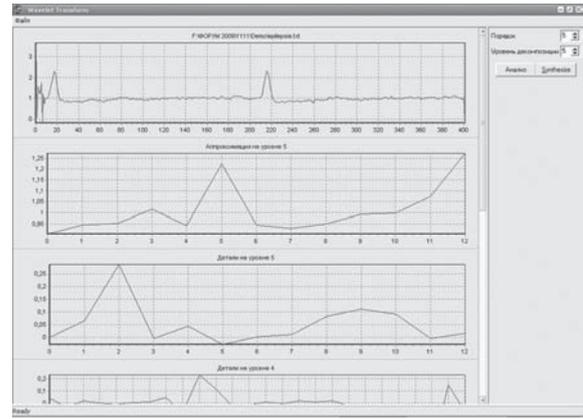


Рис. 9. Разложение сигнала масштабным анализом эпилептической ЭЭГ. Порядок Добеши 5, уровень декомпозиции 5

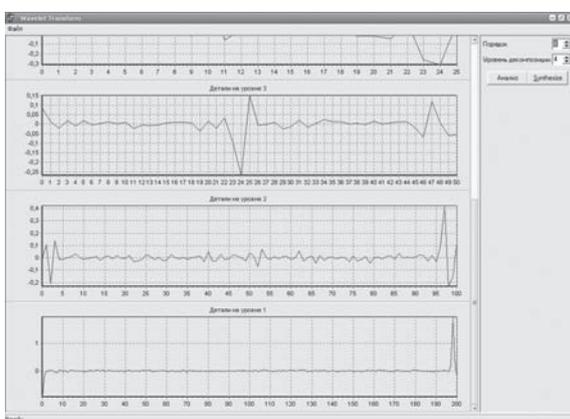
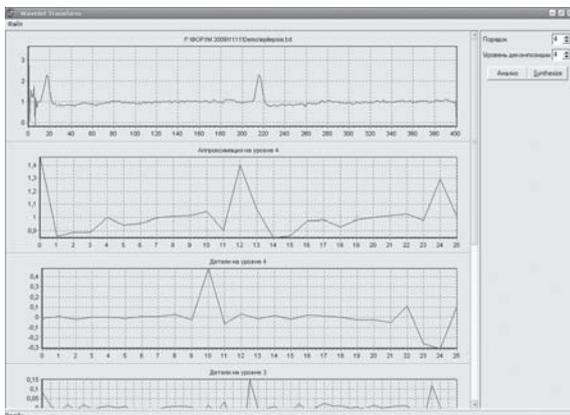


Рис. 8. Разложение сигнала масштабным анализом эпилептической ЭЭГ. Порядок Добеши 4, уровень декомпозиции 4

ВЫВОДЫ

В данной работе было разработано программное средство «Масштабный анализ по Добеши» для эффективного обнаружения локальных особенностей ЭЭГ. Это дало возможность произвести детализацию сигналов на нескольких уровнях декомпозиции, изменяя при этом порядок базисного вейвлета. Разработка основного алгоритма вычислений вейвлет-преобразований для дискретных сигналов открывает широкие возможности для практической реализации метода. Масштабный анализ определяет общий подход для поиска различных вейвлет-базисов. Этот метод очень эффективный, позволяющий повысить информативность и точность данных, а также были получены качественно новые результаты обработки ЭЭГ, что разрешает выявить аномальные участки для дальнейшего диагностирования той или иной патологии.

Литература.

- [1] Есауленко И.Э. Распознавание патологических паттернов электроэнцефалограмм с использованием вейвлет-анализа / И.Э. Есауленко, Н.П.Сереженко, С.Н. Семенов // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2009. – Т. 8, № 4. – С. 855-857.
- [2] Голуб В.А. Выявление патологических паттернов ЭЭГ с помощью вейвлет-преобразования. / В.А. Голуб, И.Н. Козлова, Н.П. Сереженко // Вестник ВГУ, Серия: Систем. анализ и информ. технологии. – 2007. – № 2. – С.61-64.

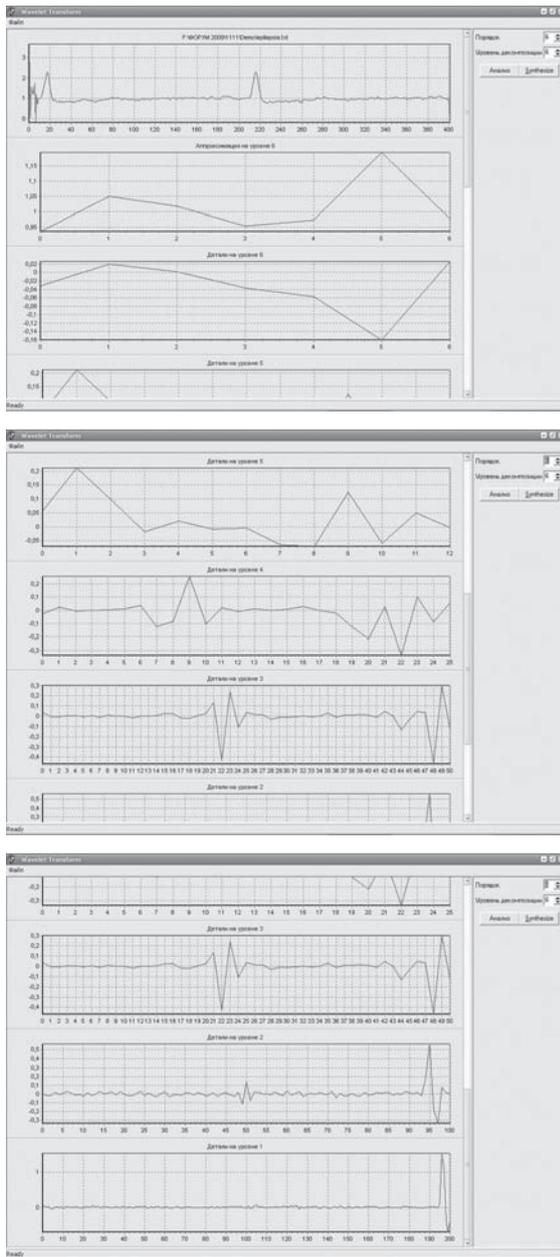


Рис. 10. Разложение сигнала масштабным анализом эпилептической ЭЭГ. Порядок Добеши 6, уровень декомпозиции 6

[3] Лапина Е.Ю. Клинико-функциональные аспекты симптоматической эпилепсии. / Автореферат. Новосибирск, 2007.

[4] Айфичер, Эммануил С., Джервис, Барри У. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание. // Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. 992 с.

[5] Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. /— Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика, 2001. — 464 с.

[6] Чернов В. И. Информационные системы отделений функциональной диагностики: электроэнцефалографическое исследование. Комплексная оценка функционального состояния организма : метод. материалы для студентов III курса леч.и пед.фак.и курсантов ФУВ. / Чернов В. И., Балишвили Д.У., Иванов М.В., Мезенцев Е.В., Семенов С.Н., Сереженко Н.П. — Воронеж, 2002. — 22 с.

[7] Новиков И.Я. Основы теории всплесков. / И.Я. Новиков, С. Б. Стечкин// Успехи матем. Наук, 1998, т. 53, №6. с. 53-128.

[8] Виноградова О.С. Гиппокамп и память / О.С. Виноградова. — М.: Наука. — 1975.

[9] Le Van Quyen M., Bragin A. Analysis of dynamic brain oscillations: methodological advances / Trends in Neurosciences. — 2007. — V.30. - №7. - P.365373.

[10] Дьяконов В.П. MATLAB 6.0/6.1/6.5/6.5 + SP1 Simulink 4/5 Обработка сигналов и изображений. / Москва «СОЛОН-Пресс» с. 297-310.-2005-591с.

[11] В.В. Генпенер, Д.А. Черниченко, С.А. Экало. Wavelet-преобразование в задачах цифровой обработки сигналов. / Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2002, 74 с.

[12] Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim, Jean-Michel Poggi. Wavelet Toolbox for use with Matlab (User's Guide, version 1. — 626 p.

[13] Генпенер В.В., Ланне А.А., Черниченко Д.А. МАТЛАБ для DSP. Использование GUI WAVEMENU для решения инженерных задач. Часть 1 //Chip News, № 6, 2000, с. 2-8.

[14] Генпенер В.В., Ланне А.А., Черниченко Д.А. МАТЛАБ для DSP. Использование GUI WAVEMENU для решения инженерных задач. Часть 2 //Chip News, № 7, 2000, с. 6-11.

Поступила в редколлегию 29.01.2011.



Половенко Карина Григорьевна, стажер-исследователь кафедры биомедицинских электронных приборов и систем ХНУРЭ. Область научных интересов: обработка биомедицинских сигналов.

УДК 615.47

Масштабний аналіз електроенцефалограм на основі вейвлет-перетворень з базисною функцією Добеши / К.Г. Половенко // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2011. Том 10. №1. — С. 15-21.

У статті розглядається метод масштабного аналізу ЕЕГ-сигналів на основі вейвлет-перетворень з базисною функцією Добеши. Був розроблений програмний засіб, що здійснює декомпозицію ЕЕГ-сигналів за допомогою масштабного аналізу, для визначення аномальних ділянок ЕЕГ людини.

Ключові слова: масштабний аналіз, пряме та обернене вейвлет-перетворення, ЕЕГ.

Іл.10. Бібліогр.: 14 найм.

UDC 615.47

Large-scale analysis of the EEG based on wavelet transforms with Daubechies basis function / K.G. Polovenko // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2011. Vol. 10. № 1. — P. 15-21.

The paper considers the method of large-scale analyzing of EEG signals based on wavelet transforms with Daubechies basis function. A software tool is developed which performs decomposition of EEG signals using scale analysis to determine areas of abnormal human EEG.

Keywords: scale analysis, direct and inverse discrete wavelet transform, EEG.

Fig. 10. Ref.: 14 items.