

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиопизики и нелинейной динамики

**Распознавание характерных паттернов электроэнцефалогрaмм с  
применением вейвлетов**

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 2 курса 241 группы  
направления 03.04.03 «Радиопизика»  
физического факультета  
Кондратьева Романа Альбертовича

Научный руководитель  
профессор, д.ф.-м.н., профессор \_\_\_\_\_ А.Н. Павлов

Зав. кафедрой  
д.ф.-м.н., профессор \_\_\_\_\_ В.С. Анищенко

Саратов 2017 год

## ВВЕДЕНИЕ

Нейродинамика представляет собой обширный раздел естествознания, где для получения базовых сведений о принципах и механизмах деятельности нервной системы важно объединять усилия специалистов в области физики, биологии, химии, математики, нелинейной динамики [1]. К настоящему времени прогресс, достигнутый в изучении молекулярных и ионных механизмов, определяющих активность индивидуальных нейронов, создал базу для изучения таких вопросов как: принципы генерации информационного кода нейронами, обработка и представление сенсорной информации в головном мозге. К числу основных функций головного мозга относится обработка информации, которая поступает из окружающего мира. Различные стимулы кодируются рецепторами и преобразуются в последовательности электрических импульсов. До того, как эти импульсы попадут в кору головного мозга, где будет создано представление об окружающем мире, информация, содержащаяся в электрических импульсах, распространяется через несколько промежуточных звеньев, которые участвуют в ее преобразовании и усложнении, в результате чего будет создан интегральный информационный код. По мере прохождения новых звеньев значительно растет сложность анализа соответствующих процессов, так как интегрируется информация от огромного числа нейронов. Знание о том, как с помощью электрических импульсов нейронов можно передать информацию об окружающем мире, что представляют собой алгоритмы запоминания и обучения, на сегодняшний день очень важны для естествознания в целом.

К настоящему времени достигнуты большие успехи в области изучения процессов передачи и преобразования сигналов на разных уровнях центральной нервной системы – от клеток-рецепторов до коры мозга. Но эти существенные достижения, достигнутые в нейрофизиологии, до сих пор не позволяют полностью ликвидировать существующее отставание в сфере анализа и цифровой обработки данных нейрофизиологических экспериментов. Основная масса проводившихся исследований в этой области ограничивается небольшим

числом методов обработки экспериментальных сигналов – корреляционным анализом, расчетом средней частоты генерации нейронных потенциалов действия, методами математической статистики применительно к последовательностям интервалов времени между импульсами и т.п. Но часто эти методы дают весьма поверхностную информацию и не позволяют охарактеризовать сложную динамику нейронных ансамблей. Это можно проиллюстрировать, рассмотрев нейронный отклик на периодическое воздействие. В случае однотипной реакции нейрона, наличие периодического сигнала на входе вело бы к сигналу с тем же периодом на выходе. Однако часто наблюдается совсем другая реакция, которая меняется во времени. По этой причине повторное воздействие будет вызывать отклик, который отличается от того, который был вначале. Соответствующие изменения являются проявлением синаптической пластичности – то есть механизма, который является ответственным за обучение нейронных сетей и формирование памяти. Соответствующие изменения отклика связаны с тем, что нейронные сети обладают свойством адаптации. По этой причине при анализе динамики живых систем недостаточно только рассмотрения статистических характеристик, необходимо изучать еще и отклик в динамике. Если применить методы исследования процессов с меняющимися характеристиками, то это позволит добиться получения более информативных сведений о процессах, происходящих в нервной системе. К числу таких методов относится вейвлет-анализ [2, 3].

В последние годы вейвлеты нашли свое применение в разных областях науки и техники. Этот инструментарий успешно зарекомендовал себя при решении задач цифровой фильтрации, сжатия данных, обработке изображений и т.д. Важной особенностью вейвлет-преобразования является его применимость при изучении динамики систем с меняющимися во времени характеристиками. В связи с этим данный инструментарий имеет значительный потенциал в решении задач анализа структуры процессов, отражающих динамику живых систем [4, 5], так как стандартные методы спектрально-

корреляционного анализа и математической статистики применимы только к стационарным процессам. Несмотря на то, что вейвлеты давно применяются в различных областях естествознания, их использование в медицине и нейрофизиологии пока еще не приобрело массовый характер, и относительная доля статей, в которых вейвлеты применяются для получения информации о структуре сложных сигналов, пока еще невелика. Но даже при таких условиях важно отметить, что первые попытки использовать теорию вейвлетов в нейродинамике являются весьма успешными.

**Целью данной выпускной квалификационной работы** является изучение возможности использования вейвлет-анализа для решения задач распознавания процессов, связанных с воображением двигательной активности на основе анализа сигналов электроэнцефалограмм.

**Материалы исследования.** Исследования проводились на основе анализа экспериментальных данных. В качестве основного инструмента исследования выбран метод вейвлет-анализа.

Выпускная квалификационная работа содержит введение, шесть глав (1. Основы теории вейвлетов; 2. Общие сведения об электроэнцефалографии; 3. Применение методов на основе непрерывного вейвлет-преобразования для выделения временных паттернов в сигналах электроэнцефалограмм; 4. Уменьшение влияния помех и шумов на выделение паттернов во временных реализациях и удаление артефактов; 5. Локализация и изучение временных паттернов в записях электрической активности головного мозга, определение частотно-временных характеристик паттернов; 6. Результаты проведенных исследований), заключение и список использованных источников. Общий объем работы 63 стр.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Основы теории вейвлетов.** Нестационарность динамики является характерной особенностью большинства процессов в природе. Стандартный инструментарий цифровой обработки сигналов изначально был создан для

анализа динамики систем с постоянными характеристиками. Именно для анализа таких процессов применяются методы математической статистики и спектрально-корреляционный анализ; их использование в случае нестационарной динамики часто приводит к проблемам в правильной интерпретации результатов вычислений. В качестве инструмента цифровой обработки нестационарных процессов выступает вейвлет-анализ [6]. Вейвлеты зарекомендовали себя при решении многих задач, связанных с сжатием больших объемов информации, подавлением шумов, синтезом сигналов, анализом изображений и т.д. Потенциал теории вейвлетов крайне обширный. Сейчас они представляют нечто гораздо большее и масштабное, чем просто альтернатива классического спектрального анализа.

**Общие сведения об электроэнцефалографии.** Электроэнцефалограмма – запись электрической активности головного мозга, полученная с помощью электродов, расположенных на поверхности головы. В настоящее время ЭЭГ является незаменимым источником информации в клинической практике, в нейробиологии и смежных науках. Обычно одновременно регистрируется не один, а несколько сигналов электрической активности мозга, снимаемые из различных точек на поверхности головы, или из различных внутренних областей головного мозга (так называемые, многоканальные записи ЭЭГ). Методы ЭЭГ широко используют для исследования активности головного мозга человека и животных в спокойном состоянии и при различных функциональных нагрузках.

**Применение методов на основе непрерывного вейвлет-преобразования для выделения временных паттернов в сигналах электроэнцефалограмм.** Проблема выделения характерных осцилляторных паттернов в зашумленных временных реализациях возникает при решении широкого круга задач анализа динамики систем различной природы по экспериментальным данным. С этой целью в последние годы активно применяются методы, основанные на вейвлет-анализе и комбинированных алгоритмах, применяющих вейвлет-анализ в качестве одного из этапов

цифровой обработки сигналов. В частности, с использованием непрерывного вейвлет-преобразования был предложен ряд алгоритмов, позволяющих существенно повысить качество решения соответствующих задач при наличии сильных фоновых помех [4, 5].

**Уменьшение влияния помех и шумов на выделение паттернов во временных реализациях и удаление артефактов.** Решение задачи выделения характерных осцилляторных паттернов в экспериментальных данных осложняется не только наличием фоновых помех и шумов, но и присутствием артефактов различной природы. Так, например, записи электроэнцефалограмм человека неизбежно содержат артефакты, связанные с движениями глаз, морганиями, двигательной активностью мышц и т.д. Соответствующие электрические сигналы имеют большую интенсивность, и их сложно устранять с применением стандартных методов фильтрации, основанных на спектральном анализе, которые в целом неэффективны для удаления локализованных помех. По этой причине значительное внимание уделяется развитию методов автоматического распознавания и коррекции артефактов без сегментирования экспериментально регистрируемых сигналов электрической активности мозга. Такие методы часто применяют в качестве основного алгоритма дискретное вейвлет-преобразование [7, 8].

**Локализация и изучение временных паттернов в записях электрической активности головного мозга, определение частотно-временных характеристик паттернов.** Осцилляторные паттерны в сигналах электрической активности головного мозга характеризуются небольшой длительностью и значительной вариабельностью в пределах одной и той же записи ЭЭГ. При функциональных нарушениях динамики головного мозга паттерны могут нести информацию о процессах трансформации нормальной электрической активности нейронного ансамбля головного мозга в патологическую активность. В связи с этим представляется важным не только выявить сам факт наличия паттернов данного типа, но и изучить особенности

их структуры, выявить характерные признаки, которые могли бы применяться в диагностических целях.

**Результаты проведенных исследований.** В ходе проводимых исследований решалась следующая задача. Если человек совершает движение рукой или ногой, то во время движения происходят изменения структуры сигнала ЭЭГ, в связи с тем, что данный сигнал отражает процесс принятия решения. Этот процесс очень кратковременный, однако в течение 2-3 секунд в структуре сигнала ЭЭГ удастся выявить некоторые отличия от фоновой записи. Возникает вопрос – а что, если человек представляет, что он совершает движение, и осуществляет его мысленно? Можно ли по сигналу ЭЭГ зафиксировать сам факт изменения структуры сигнала, соответствующего такой воображаемой деятельности? Этот вопрос является крайне актуальным в связи с развитием направления, связанного с разработкой интерфейсов типа «мозг-компьютер», фактически представляющих собой средства, реагирующие на мысленные намерения человека. Такие работы ведутся достаточно активно – например, известны исследования, направленные на анализ сигналов головного мозга, для управления курсором мыши (движений вправо или влево). Конечно, нужно признать, что это крайне сложная область, для достижения успеха в которой важно понимание тех возможностей, которые могут быть реализованы при анализе ЭЭГ – какую информацию можно извлечь из данных сигналов во время когнитивной деятельности?

Учитывая небольшую длительность фрагментов ЭЭГ, соответствующих разным вариантам воображаемых движений, а также принимая в расчет изменения частотно-временной структуры сигналов электрической активности головного мозга при воображении двигательной активности, инструментарий для цифровой обработки сигналов подбирался с учетом специфики анализируемых экспериментальных данных. Ключевым при выборе метода исследования была его способность извлекать информацию о сложной структуре электрофизиологических процессов по нестационарным, коротким и зашумленным данным. К числу таких методов, прежде всего, относится

вейвлет-анализ и подходы, базирующиеся на вейвлет-преобразовании. Принимая во внимания многочисленные результаты, свидетельствующие об успешном применении для диагностики состояния физиологических систем основанного на вейвлет-анализе мультифрактального формализма [9], были изучены возможности этого подхода для выявления различий между фоновыми записями ЭЭГ, реальными и воображаемыми движениями.

Предварительно метод мультифрактального анализа был детально протестирован на примере записей ЭЭГ нескольких испытуемых, что позволило выбрать наиболее информативные количественные критерии, позволяющие выявлять различия между реальными и воображаемыми движениями. В качестве критериев были рассмотрены следующие характеристики спектра сингулярностей: 1) среднее значение показателя Гёльдера  $H$ , которое определяется по положению максимума спектра сингулярностей  $D(h)$ ; 2) коэффициент симметрии формы спектра сингулярностей; 3) ширина спектра сингулярностей, позволяющая оценивать степень сложности (неоднородности) анализируемого сигнала; 4) диапазон изменения фрактальных размерностей. Последние две характеристики дополнительно оценивались для диапазонов слабых и сильных сингулярностей (малых и больших флуктуаций) по-отдельности. Проведенные расчеты показали, что несмотря на то, что многие из этих характеристик демонстрировали различия для случаев реальных и воображаемых движений, эти различия имели индивидуальные особенности и проявлялись не у всех испытуемых. Однозначные различия между реальными и воображаемыми движениями удалось зафиксировать при выборе в качестве количественного критерия величины среднего значения показателя Гёльдера  $H$ .

Таким образом, для обнаружения фрагментов ЭЭГ, ассоциированных с воображаемыми движениями, по фрагментам длительности 4 секунды (после звукового сигнала, по которому испытуемый или совершал реальное движение рукой или ногой, или мысленно представлял, что он совершает движение) проводилось непрерывное вейвлет-преобразование с базисной функцией

МНАТ, выделение скелетона, построение обобщенных статистических функций, вычисление скейлинговых показателей путем анализа степенной зависимости обобщенных статистических функций от временного масштаба, вычисление показателей Гельдера и расчет спектра сингулярностей с применением преобразования Лежандра. Значение показателя Гельдера  $H$ , соответствующее максимуму спектра сингулярностей, рассматривалось в качестве количественного критерия для распознавания типа движения (реальное или воображаемое).

С помощью такой методики были проведены исследования, направленные на выявление паттернов ЭЭГ, ассоциированных с воображаемыми движениями. Были детально проанализированы результаты экспериментов на 13 испытуемых, в рамках которых изучались паттерны ЭЭГ, регистрируемые во время реальных и воображаемых движений руки или ноги испытуемого. На данном этапе основной задачей являлось установление достоверных различий между случаем реального и воображаемого движения. Как показали предварительные исследования, отличия между типом движения (правая или левая рука/нога) являются менее значительными, а общие (одинаковые) закономерности изменения показателей Гельдера для реальных движений по сравнению с воображаемыми наблюдаются для всех типов движений. По этой причине были наиболее тщательно проанализированы результаты экспериментов для одного типа движения (правая рука).

Проведенные расчеты спектров сингулярностей позволили выявить значительные различия между реальными и воображаемыми движениями, которые находят отражение в положении спектра сингулярностей, то есть в значении среднего показателя Гельдера  $H$ . Эти изменения проиллюстрированы на рисунке 1 для случая движений правой руки. На данном рисунке показаны усредненные значения  $H$  для каждого испытуемого (серия экспериментов реального/воображаемого движения составляла 40-60 отдельных испытаний) вместе со стандартными ошибками среднего. Хорошо видно, что во всех случаях диапазоны изменения  $H$  не перекрываются, и различия между

реальными и воображаемыми движениями являются одинаковыми (при реальных движениях  $H$  больше, чем при воображаемых), что свидетельствует о том, что вычисляемая характеристика служит объективным диагностическим маркером.

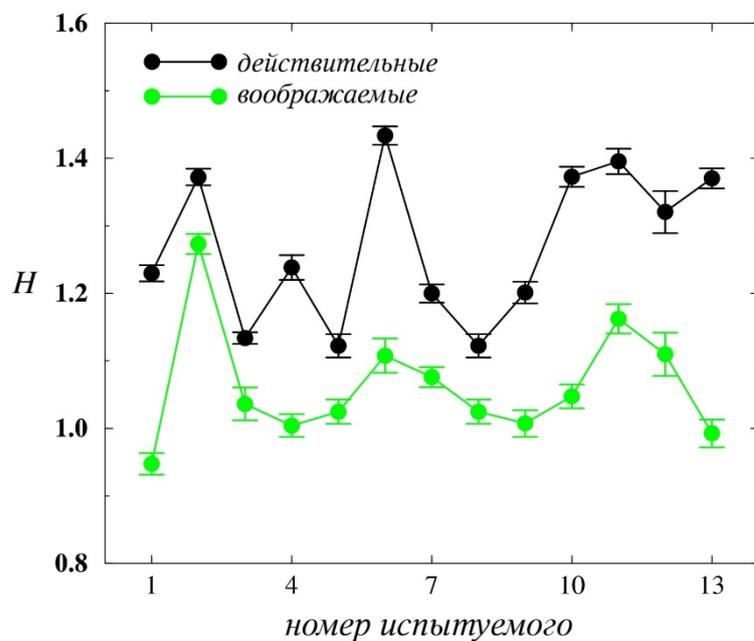


Рисунок 1 – Средние значения показателя Гёльдера, соответствующие сигналам ЭЭГ при действительных и воображаемых движениях правой руки

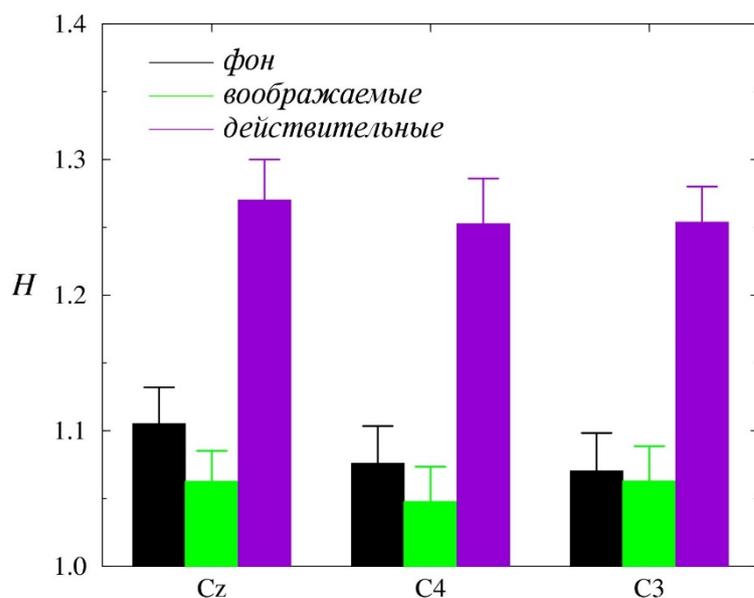


Рисунок 2 – Результаты статистического анализа (для 3-х каналов ЭЭГ)

Несмотря на значительную вариабельность показателей Гёльдера, что является отражением индивидуальных особенностей испытуемых, во всех экспериментах зафиксировано увеличение значения  $H$  для реальных движений по сравнению с воображаемыми, и этот эффект, пусть и в разной степени, наблюдается во всех проанализированных каналах ЭЭГ. Таким образом, различия между реальными и воображаемыми движениями руки можно надежно диагностировать независимо от выбранного канала. Отличия реальных движений от фоновой активности ЭЭГ являются также значительными во всех каналах (рисунок 2), тогда как распознавание фоновой активности и воображаемых движений руки зависит от расположения электрода, с помощью которого регистрируется электрическая активность головного мозга. Как видно из рисунка 2, такие различия являются наиболее существенными (из приведенных каналов) для канала Cz, и становятся незначительными, то есть сопоставимыми с вариабельностью показателей Гёльдера для разных испытаний, при обработке сигнала ЭЭГ канала Cz.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день применение вейвлет-анализа в нейродинамике является довольно новым подходом. Как и любому новому подходу, данному методу потребуется некоторое время, чтобы стать инструментом повседневного применения. Это особенно актуально для медицины, где применение новых методов должно пройти тщательную проверку и адаптацию, чтобы доказать свою целесообразность. Следует отметить, что помимо того, что вейвлет-анализ позволяет выявить новые особенности структуры нейрофизиологических сигналов, он так же весьма удачно комбинируется с классическими методами исследования экспериментальных данных, значительно расширяя их возможности.

Электроэнцефалография является довольно обширной областью нейрофизиологии. В данной работе были лишь кратко освещены возможности вейвлетов в анализе электроэнцефалограмм. Тем не менее, можно сказать, что

перспективы вейвлет-анализа здесь довольно обширны, как и в нейродинамике в целом.

В работе проведены исследования, направленные на выявление паттернов ЭЭГ, ассоциированных с воображаемыми движениями. Были детально проанализированы результаты экспериментов на 13 испытуемых, в рамках которых изучались паттерны ЭЭГ, регистрируемые во время реальных и воображаемых движений правой руки испытуемого. Было показано, что проведение расчетов среднего показателя Гёльдера позволяет достоверно (во всех случаях) диагностировать различия между реальными и воображаемыми движениями.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

- [1] Destexhe, A. Thalamocortical assemblies / A. Destexhe, T. J. Sejnowski. – Oxford: Oxford University Press, 2001. – 428 p.
- [2] Астафьева, Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения / Н.М. Астафьева // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145–1170.
- [3] Дремин, И.М. Вейвлеты и их использование / И.М. Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171, №5. С. 465–501.
- [4] Sitnikova, E. Time-frequency characteristics and dynamics of sleep spindles in WAG/Rij rats with absence epilepsy / E. Sitnikova, A. E. Hramov, V. V. Grubov, A. A. Koronovsky // Brain Research. – 2014. – Vol. 1543. – P. 290–299.
- [5] Sitnikova, E. Developmental changes in the frequency-time structure of sleep spindles on the EEG in rats with a genetic predisposition to absence epilepsy (WAG/Rij) / E. Sitnikova, V. V. Grubov, A. E. Hramov, A. A. Koronovsky // Neuroscience and Behavioral Physiology. – 2014. – Vol. 44. – P. 301–309.

- [6] Хованова Н. А. Методы анализа временных рядов / Н. А. Хованова, И. А. Хованов. – Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 2001. – 130 с.
- [7] Jansen, M. Noise reduction by wavelet thresholding / M. Jansen. – New York: Springer-Verlag, 2001.
- [8] Donoho, D. L. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage / D. L. Donoho, I. M. Johnstone. // *Biometrika*. – 1994. – Vol. 81. – P. 425–455.
- [9] Muzy, J. F. Wavelets and multifractal formalism for singular signals: application to turbulence data / J. F. Muzy, E. Bacry, A. Arneodo // *Phys. Rev. Lett.* – 1991. – Vol. 67. – P. 3515–3518.