

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики открытых систем

**Анализ координированной динамики ритмов головного мозга по
экспериментальным данным**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 2241 группы
направления 09.04.02 «Информационные системы и технологии»
код и наименование направления
института физики
наименование факультета, института, колледжа
Крюковой Кристины Сергеевны
фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, уч. звание

подпись, дата

А.Н. Павлов

Инициалы Фамилия

Заведующий кафедрой физики открытых систем

полное наименование кафедры

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, уч. звание

подпись, дата

А.А. Короновский

Инициалы Фамилия

Саратов 2026 г.

ВВЕДЕНИЕ

Динамика работы мозга представляет собой сложный и многогранный процесс, характеризующийся четкими ритмами, которые проявляются на различных уровнях организации и в широком диапазоне временных масштабов. На микроскопическом уровне наблюдаются сложные схемы возбуждения отдельных нейронов и взаимодействия между популяциями нейронов в различных областях мозга. Эти взаимодействия приводят к возникновению уникальных ритмов электрической активности с различными частотными характеристиками и пространственно-временной динамикой.

Ритмы мозга оказывают влияние на множество физиологических состояний и связаны с различными нейрофизиологическими и когнитивными функциями, включая патологические состояния. Традиционная парадигма исследований мозга сосредоточена на изучении роли этих ритмов и их связи с определенными физиологическими состояниями и функциями, которые часто рассматриваются как взаимоисключающие. Например, во время глубокого сна преобладают низкочастотные дельта-волны, в то время как в состоянии бодрствования доминируют высокочастотные альфа- и бета-волны. Понимание этих процессов открывает новые горизонты для изучения функционирования мозга и его роли в поддержании здоровья [1].

Цель данной выпускной квалификационной работы: на основе относительной спектральной плотности ритмов электрической активности головного мозга в разных стадиях цикла сон-бодрствование провести анализ координированной динамики основных ритмов и сопоставить особенности кооперативной динамики ритмов в норме и при патологии (черепно-мозговой травме).

Выпускная квалификационная работа содержит введение, пять глав (1. Теоретические основы анализа динамики ритмов мозга; 2. Спектральный анализ ЭЭГ-сигналов; 3. Взаимодействия ритмов мозга как маркеры физиологических состояний; 4. Динамика взаимодействия ритмов ЭЭГ у

подростков с черепно-мозговыми; 5. Практическая часть), заключение, список использованных источников и приложение. Общий объем работы 54 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Теоретические основы анализа динамики ритмов мозга

Неинвазивная электроэнцефалография (ЭЭГ) коры головного мозга стала относительно простым и удобным способом анализа того, как большие группы нейронов могут взаимодействовать между собой для реализации сложных функций мозга. Метод ЭЭГ позволяет легко визуализировать спонтанную активность мозга, организованную в виде волн или «ритмов», которые возникают из-за синхронизации миллионов нейронов коры головного мозга с основными частотами от 0,5 до 35 Гц и более, определяющими так называемые диапазоны δ , θ , α , β и γ . Каждый из этих ритмов связан с различными состояниями сознания, такими как глубокий сон, анестезия, кома, расслабление и внимание, а также с различными психическими и когнитивными процессами в мозге [2].

Динамика ритмов мозга при переходе от бодрствования (W) к глубокому сну (N3) представляет собой сложный, многоуровневый процесс, вовлекающий таламокортикальные, кортико-кортикальные и гиппокампальные сети. Современная концепция «коммуникации через когерентность» предполагает, что различные области мозга обмениваются информацией только тогда, когда их осцилляторная активность синхронизирована по частоте и фазе [3]. Последовательная смена состояний (W \rightarrow N1 \rightarrow N2 \rightarrow N3 \rightarrow REM) сопровождается кардинальной перестройкой спектрального профиля.

2. Спектральный анализ ЭЭГ-сигналов

ЭЭГ представляет собой типичный пример нестационарного сигнала: его статистические свойства (среднее, дисперсия, спектральный состав) изменяются во времени. Переход от бодрствования ко сну, появление сонных

веретен, К-комплексов и других кратковременных феноменов – всё это требует методов, способных одновременно определить события как во времени, так и в частоте.

Классическое преобразование Фурье (FFT), вычисленное для всей длительности записи, дает усредненный спектр, но полностью теряет информацию о том, когда именно произошло то или иное изменение. Это неприемлемо для анализа сна, где критически важны секундные и даже субсекундные события (например, длительность веретена составляет 0.5–2 с).

Для решения этой проблемы были разработаны частотно-временные методы: кратковременное преобразование Фурье (STFT) – разбиение сигнала на перекрывающиеся сегменты с последовательным применением FFT; вейвлет-преобразование (CWT, DWT) – использование масштабируемых базисных функций, обеспечивающих адаптивное частотно-временное разрешение; методы на основе моделей авторегрессии (AR) – параметрическое моделирование спектра. Каждый метод имеет свои преимущества и ограничения.

3. Взаимодействия ритмов мозга как маркеры физиологических состояний

Сон считается необходимым для мозга и организма в целом. Преобладающая концепция заключается в том, что сон регулируется циркадной ритмичностью и гомеостазом сна – процессами, которые долгое время считались функционально и механически раздельными. Однако данные последних исследований у людей и грызунов ставят под сомнение это представление [4].

Для более глубокого понимания временных взаимодействий между ритмами мозга проводится анализ спектральной плотности мощности электроэнцефалограммы (ЭЭГ) в пяти ключевых частотных диапазонах: дельта (δ), тета (θ), альфа (α), сигма (σ) и бета (β). Эти диапазоны соответствуют основным типам волн, которые играют важную роль в

различных физиологических состояниях и когнитивных функциях. Исследования подтверждают классическую модель, согласно которой на больших временных интервалах – от минут до часов – физиологические состояния мозга характеризуются преобладанием определенных мозговых волн и их стабильным поведением [5].

При классическом анализе ЭЭГ сна, основанном на 30-секундных эпохах, каждое физиологическое состояние (бодрствование, неглубокий сон, глубокий сон, REM) характеризуется доминированием определённых частотных диапазонов.

Для каждой пары ритмов можно отследить, как профиль распределения взаимной корреляции меняется при переходе от одной стадии сна к другой. Сравнивая профили взаимодействий для различных физиологических состояний, было обнаружено, что каждое состояние характеризуется определенным набором профилей. Эти ансамбли профилей являются устойчивыми, так как они последовательно наблюдаются у всех индивидуальных испытуемых, что отражает фундаментальную особенность физиологических состояний.

При переходе от одной стадии сна к другой профиль взаимной корреляции для каждой пары мозговых волн изменяется, что приводит к сложной реорганизации всего «алфавита» взаимодействий. Основываясь на том, как форма каждого профиля эволюционирует между стадиями сна, выделяется три основных класса взаимодействий [5]:

Таблица 1: Классы взаимодействий ритмов

Класс	Тип взаимодействия	Пары ритмов	Характер связи
Класс 1	Сильные положительные корреляции	$\alpha-\sigma$, $\alpha-\beta$, $\sigma-\beta$	Параллельная модуляция амплитуд (волны синхронно растут и падают)

Класс 2	Сильные отрицательные корреляции (антикорреляции)	$\delta-\theta$, $\delta-\alpha$, $\delta-\sigma$, $\delta-\beta$	Одна волна растёт, когда другая падает (противоположная модуляция)
Класс 3	Транзиторное (переходное) поведение	$\theta-\alpha$, $\theta-\sigma$, $\theta-\beta$	Более однородное распределение взаимной корреляции, нет явно выраженной положительной или отрицательной связи

4. Динамика взаимодействия ритмов ЭЭГ у подростков с черепно-мозговыми травмами

Анализ доминирующих ритмов электрической активности мозга и индивидуальных парных взаимодействий мозговых волн предоставляет ограниченную информацию о физиологических состояниях и функциях. Можно отметить значительные различия между скоординированным поведением мозговых волн у подростков с ЧМТ и здоровых людей того же возраста, используя упрощенный метод анализа, сфокусированный на поведении средних значений относительной спектральной мощности. Различия в поведении наблюдаются во время бодрствования и становятся незначительными во время глубокого сна, что может способствовать терапевтическому эффекту сна при черепно-мозговых травмах. В последние годы сформировалась новая концепция анализа мозговых волн, основанная на теории сложных сетей. Согласно этой концепции, физиологическое состояние организма определяется не столько амплитудами отдельных ритмов, сколько координацией и согласованностью в тесном взаимодействии всех значимых ритмов ЭЭГ – как доминирующих, так и субдоминантных.

Традиционно доминирующие ритмы электроэнцефалограммы (ЭЭГ) рассматриваются как ритмы, имеющие определенное физиологическое

значение и позволяющие изучать функции мозга [6, 7]. На данный момент существуют доказательства, что при изучении физиологических состояний недостаточно ограничиваться анализом только доминирующих ритмов ЭЭГ и отдельных парных взаимодействий.

В работе [8] было обосновано, что для описания физиологического состояния необходимо изучение кросс-коммуникации различных пар ритмов в рамках динамических сетевых взаимодействий между ними.

Черепно-мозговая травма вызывает значительные нарушения в ЭЭГ. При проведении предварительных исследований баз данных ЭЭГ-записей при ЧМТ было обнаружено, что у взрослых пациентов (особенно в старших возрастных группах) полный цикл фаз сна, включая глубокий сон, наблюдается редко. В большинстве случаев идентифицируются только начальные фазы N1 (самый легкий сон) и N2 (легкий сон). Эти наблюдения согласуются с результатами других исследователей, которые также указывают на бессонницу у взрослых пациентов с ЧМТ. Однако иная ситуация наблюдается у молодых пациентов с ЧМТ, которые демонстрируют все стадии сна, включая глубокий сон. Именно поэтому исследования на подростковой выборке представляют особую ценность для понимания механизмов восстановления мозга после травмы.

5. Практическая часть

В данной работе был проведен анализ электроэнцефалографических (ЭЭГ) сигналов, направленный на изучение различий в координации ритмов, диагностируемых по зависимостям относительной спектральной плотности, между состояниями бодрствования, неглубокого сна и глубокого сна в двух группах испытуемых – здоровые подростки и подростки с ЧМТ.

Для начала работы были импортированы необходимые библиотеки, такие как NumPy и Matplotlib, которые обеспечивают функциональность для обработки данных и визуализации результатов. Эти инструменты являются стандартом в области научных вычислений и анализа данных. NumPy

предоставляет функции для работы с многомерными массивами и матрицами, а Matplotlib – для создания статических, анимационных и интерактивных визуализаций в Python.

Затем была разработана функция, выполняющая анализ ЭЭГ сигналов с использованием метода краткосрочного преобразования Фурье (STFT). Этот метод позволяет исследовать временные изменения частотного состава сигнала, что особенно важно при работе с биологическими процессами, которые могут варьироваться во времени. Спектрограмма разбивается на пять ключевых частотных диапазонов: дельта (0.5-4 Гц), тета (4-8 Гц), альфа (8-12 Гц), сигма (12-16 Гц) и бета (16-30 Гц). Эти диапазоны были выбраны на основе существующих исследований, которые показывают их связь с различными состояниями сознания. Например, дельта-ритмы ассоциируются с глубоким сном, в то время как альфа-ритмы характерны для спокойного бодрствования. Для каждого диапазона вычисляется среднее значение мощности сигнала, позволяющие получить обобщённые данные о состоянии электрической активности мозга в каждом из рассматриваемых состояний. Результаты анализа сохраняются в виде словаря, который содержит средние значения по диапазонам частот и соответствующие временные метки.

В основной части программы были загружены ЭЭГ данные из файлов, что позволило использовать реальные записи для анализа. Затем был проведен анализ для каждого состояния, чтобы выявить характерные особенности координации ритмов ЭЭГ.

На основе теоретических положений, изложенных в предыдущих главах, было проведено экспериментальное исследование, направленное на выявление различий в координации мозговых ритмов у здоровых подростков и пациентов с черепно-мозговой травмой (ЧМТ) на различных стадиях цикла «бодрствование - сон».

Учитывая нестационарный характер ЭЭГ-сигналов, вместо анализа абсолютных значений спектральной мощности (S) был использован упрощённый подход, фокусирующийся на «скачках» средних значений S при

переходах между различными стадиями цикла «бодрствование - сон». Математически изменение S при переходе из состояния 1 в состояние 2 описывается с помощью функции Хевисайда $H(t-\tau)$: $S_2(t) = S_1 + k * H(t - \tau)$, где S_1, S_2 – значения относительной спектральной плотности мощности в сравниваемых состояниях; τ – время перехода между состояниями; k – коэффициент, характеризующий выраженность изменения S ; t – время. Для количественной оценки скоординированности изменений двух ритмов при переходе между состояниями вводится мера взаимодействия: $m_{i,j} = k_i * k_j$.

Для иллюстрации были выбраны ритмы с наибольшими значениями S . Сплошными линиями показаны изменения средних значений относительной спектральной плотности мощности. Зелеными пунктирными линиями отмечены исходные зависимости $S(t)$ (рис. 1).

С использованием меры $\Delta m = m_{ТВ1} - m_{control}$ было проведено сравнение переходов между стадиями цикла «бодрствование - сон» для групп с ЧМТ и здоровых подростков (рис. 2).

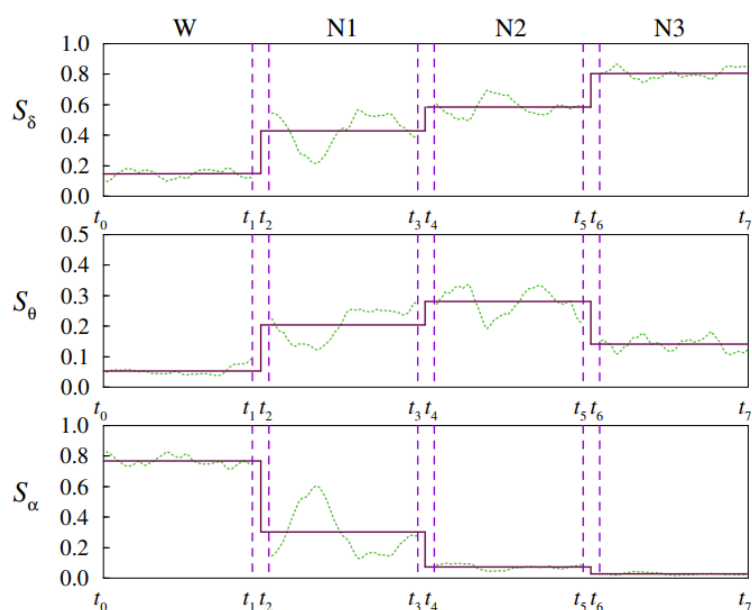


Рисунок 1 – Относительная спектральная плотность мощность δ -, θ - и α -ритмов на различных стадиях цикла «бодрствование - сон»

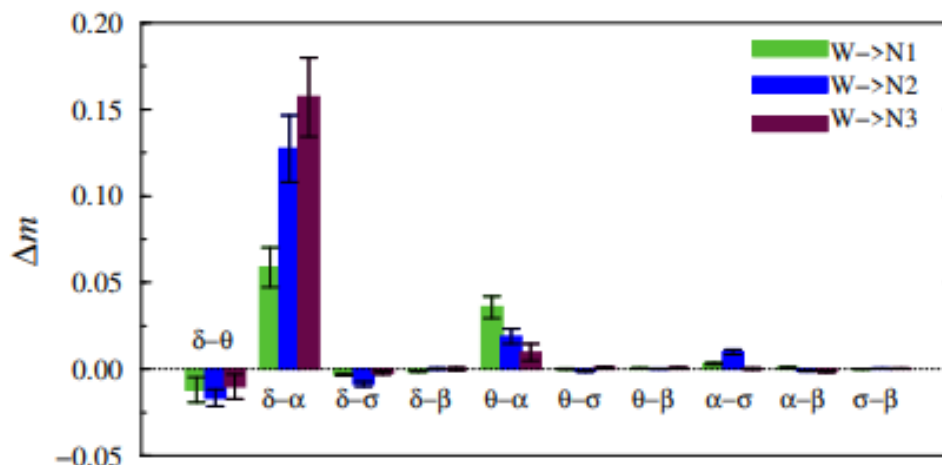


Рисунок 2 – Значения Δm для переходов от бодрствования к трём стадиям сна

Согласно рисунку 2, различия в показателе корреляции m между контрольной группой и пациентами с ЧМТ отличаются для представленных пар ритмов: для некоторых пар они практически отсутствуют (незначительны), в то время как для других различия становятся более выраженными. Значимые различия присутствуют для всех стадий сна, однако при переходе к глубокому сну ($W \rightarrow N3$) они становятся максимальными.

Таким образом, изучение переходов между глубоким сном и бодрствованием позволяет нам выявить значительные изменения в координации ритмов ЭЭГ при ЧМТ по сравнению со здоровыми добровольцами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной дипломной работе был проведён комплексный анализ спектральной динамики ЭЭГ-сигналов в различных состояниях сна и бодрствования, а также рассмотрены возможности применения современных методов частотно-временного анализа для выявления нарушений координации мозговых ритмов при черепно-мозговой травме (ЧМТ) у подростков.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что глубокий сон обладает нормализующим эффектом на координацию мозговых ритмов у пациентов с ЧМТ. Во время глубокого сна различия между контрольной группой и группой с ЧМТ практически исчезают, что может быть объяснено в рамках гипотезы о терапевтическом эффекте сна при черепно-мозговой травме.

Разработанный метод анализа переходов между состояниями сна и бодрствования может быть использован в клинической практике для:

- Диагностики нарушений координации мозговых ритмов при ЧМТ;
- Оценки эффективности посттравматической терапии;
- Мониторинга восстановительных процессов в период реабилитации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

[1] Menesse, G. Information dynamics of in silico EEG Brain Waves: Insights into oscillations and functions / G. Menesse, J. J. Torres // PLoS Comput Biol. - 2024. - № 9.

[2] Спектральный анализ / [Электронный ресурс] // CMI Brain Research: сайт. - URL: <https://cmi.to/методы/спектральный-анализ/> (дата обращения: 05.01.2026).

[3] Whittington, M. A. A future for neuronal oscillation research / M. A. Whittington, R. D. Traub, N. E. Adams // Brain and Neuroscience Advances. - 2018 - Т. 2. - DOI: 10.1177/2398212818794827.

[4] Franken, P. Sleep and circadian rhythmicity as entangled processes serving homeostasis / P. Franken, D.-J. Dijk // Nature Reviews Neuroscience. - 2024. - Т. 25. - С. 43-59.

[5] Steriade M. Neuronal plasticity in thalamocortical networks during sleep and waking oscillations / Mircea Steriade, Igor Timofeev // Neuron. - 2003. - № 4. - С. 563-576.

[6] Miltner, W. H. R. Coherence of gamma-band EEG activity as a basis for associative learning / W. H. R. Miltner, C. Braun, M. Arnold [и др.] // Nature. – 1999. - Т. 397. - С. 434-436.

[7] Klimesch, W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis / W. Klimesch // Brain Research Reviews. – 1999. – Т. 29, № 2–3. - С. 169-195.

[8] Chen, B. Ensemble of coupling forms and networks among brain rhythms as function of states and cognition / B. Chen, L. F. Ciria, C. Hu [и др.] // Communications Biology. - 2022. - Т. 5, № 1. - С. 82.