

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

Кафедра физики открытых систем

Координация ритмов ЭЭГ в рамках концепции сетевого взаимодействия

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 4041 группы
направления 09.03.02 «Информационные системы и технологии»
код и наименование направления
института физики
наименование факультета, института, колледжа
Кучминой Кристины Дмитриевны
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 2025 г.

ВВЕДЕНИЕ

Современная нейронаука рассматривает мозг как сложную систему, функционирование которой основано на принципах сетевой организации. Согласно этой концепции, когнитивные процессы обеспечиваются скоординированной активностью распределенных нейронных ансамблей, что находит свое отражение в синхронизированных ритмах электроэнцефалограммы (ЭЭГ) [1]. Эти ритмические паттерны демонстрируют как временную, так и пространственную организацию нейронной активности, представляя собой важный объект для изучения механизмов интеграции информации в нервной системе и их нарушений при различных нейropsychиатрических патологиях [2, 3].

Актуальность исследования механизмов координации ЭЭГ-ритмов определяется тремя основными аспектами. Многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что ритмическая активность мозга играет ключевую роль в реализации таких фундаментальных когнитивных функций, как внимание, процессы памяти и принятие решений. Современные методы анализа функциональной связности, включая оценку когерентности, фазовой синхронизации и применение графовых метрик, предоставляют исследователям мощный инструмент для количественного описания сетевой организации мозговой динамики. Кроме того, изучение особенностей взаимодействия ЭЭГ-ритмов имеет существенное практическое значение для разработки новых подходов к диагностике и терапии заболеваний, связанных с нарушениями нейронной интеграции, включая эпилепсию, шизофрению и нейродегенеративные заболевания.

Целью данной выпускной квалификационной работы является изучение закономерностей координации ЭЭГ-ритмов в контексте сетевого взаимодействия и исследование возрастных особенностей координации ритмов во время разных стадий сна.

Материалы исследования. Расчеты проводились по сигналам ЭЭГ здоровых испытуемых различного возраста. Каждая запись включала фрагменты продолжительностью не менее 5 мин для следующих состояний: бодрствования (W), легкого сна (LS), глубокого сна (DS) и быстрого сна (REM). Были отобраны 2 группы: 1-я группа (20-40 лет) включала 18 человек и 2-я группа (60-80 лет) включала 25 человек. Анализировались сигналы с каналов O1 и O2, результаты вычислений по этим каналам усреднялись для каждого испытуемого.

Выпускная квалификационная работа содержит введение, семь разделов основной части ВКР (1. Концепция сети Small-world; 2. Исследование мозговой деятельности на основе теории графов; 3. Теоретические основы исследования ЭЭГ; 4. Ритмы мозга и синтаксис нейронов; 5. Современные методы анализа, их метрики и показатели; 6. Современные методы сетевой нейронауки; 7. Практическая часть), заключение и список использованных источников. Общий объем работы 46 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Концепция сети Small-world. Обсуждается архитектура нейронных сетей и возможность использования концепции Small-world для ее описания. Прошло почти 20 лет с тех пор, как концепция сети Small-world была впервые количественно определена с помощью комбинации высокой кластеризации и короткой длины пути; и около 10 лет с тех пор, как эта метрика сложной топологии сети начала широко применяться для анализа нейровизуализации и других данных нейронауки в рамках быстрого роста новой области коннектомики. Было обнаружено, что простые генеративные модели, которые добавляют ребра к сети на основе пространственного расстояния и топологических отношений между узлами, могут повторять Small-world и многие другие свойства объединения на основе двух (пространственных и топологических) параметров.

2. Исследование мозговой деятельности на основе теории графов.

В теории графов сеть определяется как набор узлов или вершин и ребер или линий между ними. Топология графа может быть количественно описана с помощью широкого спектра показателей. Пока не установлено, какие показатели наиболее подходят для анализа мозговых сетей. В сетевой науке методологические достижения позволяют нам количественно оценивать другие топологические свойства сложных систем, такие как модульность, иерархичность, центральность и распределение сетевых хабов – многие из которых уже были измерены в мозговых сетях.

3. Теоретические основы исследования ЭЭГ.

Электроэнцефалография – один из самых распространенных неинвазивных методов исследования головного мозга. Изучая результаты обследования, существует возможность оценивать функциональное состояние структуры головного мозга, а также определять возможные источники патологий в его электрической активности. Регистрируя результаты ЭЭГ – обследования отслеживается электрическая активность мозга под каждым электродом. Полученные данные, для удобства использования и анализа, представляют в виде кривой, у которой по оси ординат представлены временные интервалы, а по оси абсцисс – сами данные. Далее полученный график разбивается на определенные интервалы, называемые ритмами ЭЭГ.

Ритмы ЭЭГ – регулярный (имеющий постоянную частоту) тип электрической активности, соответствующий некоторому определённом состоянию мозга и связанный с определенными церебральными механизмами. В физическом смысле, при описании ЭЭГ, у ритма указывается и анализируется: частота типичная для данного участка мозга, которая характеризует все его возможные изменения; амплитуда колебаний, а также некоторые его характерные изменения во времени, отслеживаемые при возможных изменениях его функциональной активности. Различают некоторые основные ритмы: дельта-ритм (δ -ритм), тета-ритм (θ -ритм), альфа-ритм (α -ритм), гамма-ритм (γ -ритм), бета-ритм (β -ритм) и т.д.

4. Ритмы мозга и синтаксис нейронов. Ритмы мозга могут взаимодействовать друг с другом посредством множества механизмов, включая фазово-фазовую, фазово-амплитудную и амплитудно-амплитудную огибающую связи. В простейшем сценарии осцилляторы схожей частоты в пределах одной и той же или разных анатомических структур могут увлекать друг друга посредством механизма, известного как фазовая связь. Фазовая связь может быть измерена с помощью когерентности или, что предпочтительнее, более продвинутыми методами, которые не зависят от амплитудных колебаний и основаны исключительно на фазе. Менее точное по времени, но тем не менее важное взаимодействие между осцилляторами схожей частоты выражается временной ковариацией их мощности, известной как амплитудная комодуляция или связь мощности с мощностью. В этом случае постоянство фазы между волнами может отсутствовать, но вместо этого огибающие мощности (амплитуды) осцилляторов коррелируют (комодуляция мощности). Эта синхронность мощности с мощностью двух или нескольких осцилляторов в различных сетях может координироваться совместным смещением фазы мощности более быстрых колебаний более медленным ритмом, известным как кросс-частотная фазоамплитудная связь или вложенные колебания.

5. Современные методы анализа, их метрики и показатели. Рассмотрено две категории методов: метрики для анализа топологии графов и показатели для анализа ритмов ЭЭГ. При анализе ЭЭГ используются спектральные методы. Одним из наиболее часто используемых считается метод частотного или спектрального анализа. Эти методы были созданы для исследования сигналов или процессов физического и технического происхождения, но в область электрофизиологии они были перенесены значительно позже. Изначально по снимаемому ЭЭГ-сигналу могут быть вычислены некоторые частотные характеристики (они представляют собой зависимость конкретного спектрального показателя частоты), например,

амплитудный спектр; спектр мощности; фазовый спектр; кросс-спектр; когерентность; когерентная мощность и т.д.

6. Современные методы сетевой нейронауки. Нейронаука вступает в период, отмеченный быстрым увеличением объема и сложности нейронных данных, получаемых из нервной системы и охватывающих множество уровней организации. Большая часть этих «больших данных» представляет собой сети, включающие отношения или взаимосвязи, которые связывают многие элементы крупномасштабных нейробиологических систем. Примеры включают взаимодействие белков и генетические регуляторные сети, синаптические связи и анатомические проекции между областями мозга, динамические паттерны нейронной сигнализации и коммуникации, связанные со спонтанной активностью мозга и деятельностью, вызванной выполнением задачи, а также взаимодействиями между системами мозга и окружающей средой в процессе поведения. Примечательно, что эти данные часто пересекают множество уровней организации (нейроны, цепи, системы, весь мозг) или задействуют различные области биологии и типы данных (например, анатомические и функциональные связи, генетические паттерны и болезненные состояния, активность в распределенных областях мозга в связи с поведенческими фенотипами). Размер и сложность этих данных требуют сложных стратегий статистического вывода и уменьшения размерности и создают серьезные проблемы для масштабируемых вычислений, обмена данными и воспроизводимости.

7. Практическая часть. Вначале проводилась полосовая фильтрация сигналов ЭЭГ в диапазонах основных волновых процессов: дельта-, тета-, альфа-, сигма- и бета-волн. Затем по отфильтрованным сигналам (несущим информацию о динамике в соответствующем частотном диапазоне) проводился расчет нормированной спектральной мощности (НОСМ), то есть отношения спектральной плотности мощности в выбранном частотном диапазоне (конкретного ритма) к суммарной спектральной плотности мощности для всех анализируемых ритмов ЭЭГ. В результате оцениваемая

величина принимает значения в диапазоне от 0 (данный ритм отсутствует) до 1 (ритм доминирует).

НОСМ S оценивалась с использованием скользящего окна длительностью 2 секунды, затем результаты усреднялись в скользящем окне длительностью 14 секунд (с разрешением 1 секунда) для получения более гладких зависимостей. Дальнейший анализ корреляций между различными волнами проводился для 30-секундных сегментов НОСМ. Таким образом, этот подход позволяет учесть относительный вклад и, следовательно, значимость полосы частот каждого ритма ЭЭГ для анализируемого состояния.

Как и ожидалось, переходы между бодрствованием и различными стадиями сна приводят к изменениям характеристик ритмов мозга, изменяя нормированную спектральную мощность для каждого из них. На рисунках 1-3 приведены несколько примеров вычисленных зависимостей.

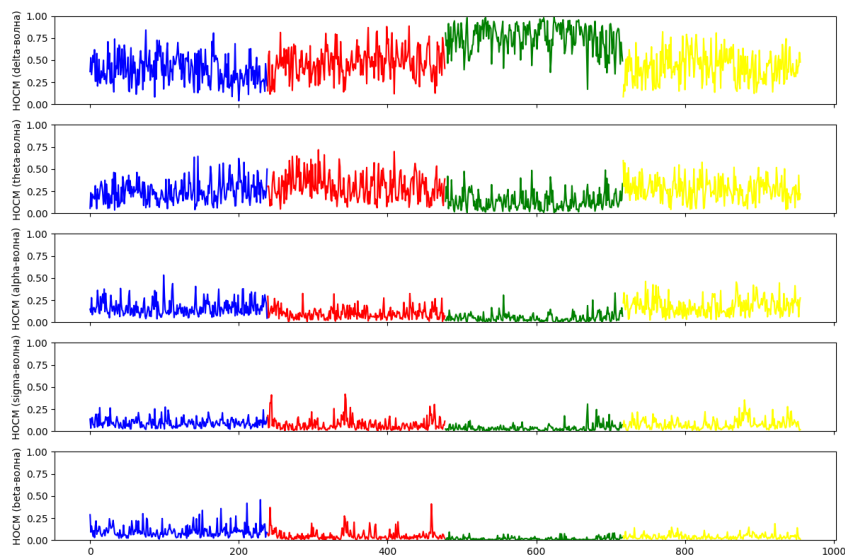


Рисунок 1 – НОСМ для испытуемого 1. Цветами выделены последовательно состояния W, LS, DS и REM

Хорошо видно, что для дельта-волны НОСМ увеличивается при переходах $W \rightarrow LS \rightarrow DS$, то есть с увеличением глубины сна. При этом для альфа-волны наблюдается уменьшение НОСМ, то есть противоположное изменение, позволяющее предположить анти-корреляцию для

соответствующих сигналов. В данном случае хорошо выражены различия между бодрствованием и глубоким сном. Визуально различия между бодрствованием и быстрым сном менее заметны. НОСМ для дельта-волны принимает наибольшие значения среди всех ритмов и варьируется в среднем примерно на 40-80% в зависимости от стадии сна. Еще два примера вычисленных зависимостей НОСМ показаны на рисунках 2 и 3.

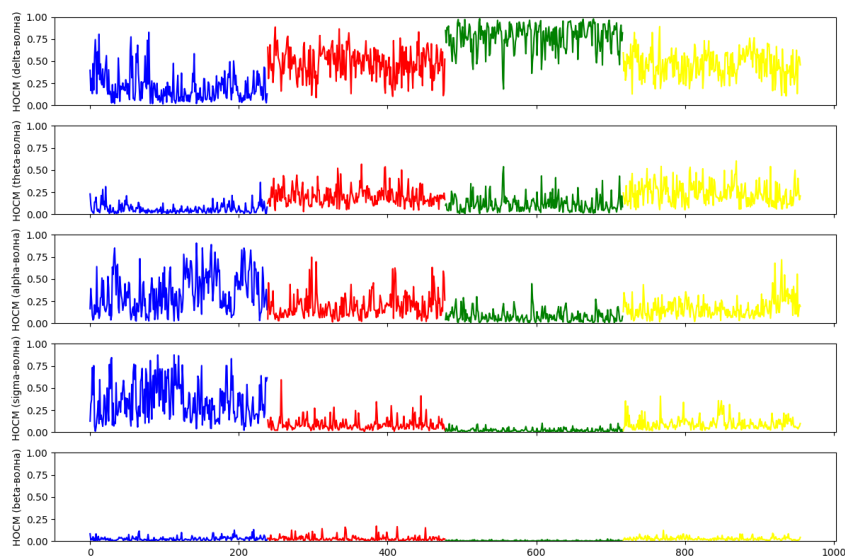


Рисунок 2 – НОСМ для испытуемого 2

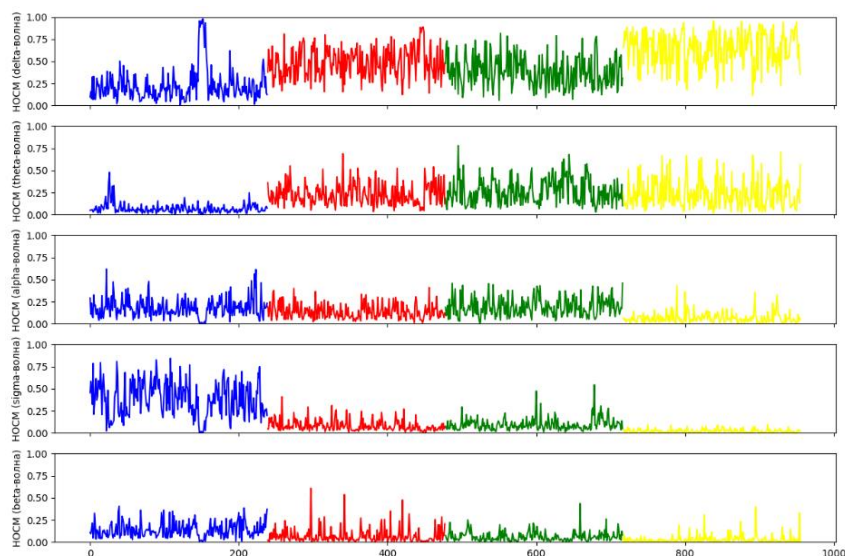


Рисунок 3 – НОСМ для испытуемого 3

На следующем этапе был проведен анализ взаимных корреляций между различными ритмами ЭЭГ для 30-секундных фрагментов сигналов НОСМ для разных комбинаций. Для этой цели проводились расчеты коэффициента корреляций

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (1)$$

Здесь, x_i и y_i представляют собой 30-секундные отрезки нормированной относительной спектральной мощности двух ритмов, $\bar{x}$ и $\bar{y}$ – средние значения (они оцениваются по всей длительности сигнала НОСМ, т.е. по всем 4-м состояниям). Такой вариант расчета позволяет получать оценки C в диапазоне от $C = -1$ (самый сильный отрицательная корреляция или антикорреляция) до $C = 1$, что возникает при самой сильной положительной корреляции, включая промежуточный случай некоррелированной динамики ($C = 0$).

Проведенный анализ продемонстрировал не только факт изменения электрической активности мозга при переходе между функциональными состояниями организма, но и обеспечил более информативное представление о деталях происходящих изменений. Были установлены возрастные различия при увеличении стадии сна, однако для выявления общих закономерностей нужно провести более детальный статистический анализ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе теоретической части работы сделаны несколько выводов:

1. Систематизированы ключевые теории, подтверждающие, что именно согласованность ритмов ЭЭГ позволяет мозгу эффективно объединять информацию из разных областей.

2. Ритмы и когнитивные функции. Анализ экспериментальных данных показывает, что синхронизация таких ритмов, как тета-, альфа-, бета- и гамма, напрямую связана с вниманием, памятью и даже творческим мышлением. Чем

лучше разные участки мозга «договариваются» между собой, тем эффективнее мы решаем задачи.

3. Пластичность и взаимодействие полушарий. Особый интерес представляет то, как правое и левое полушария координируют свою работу. Их слаженное взаимодействие помогает мозгу адаптироваться к новым условиям и учиться на собственном опыте.

В ходе практической части работы были рассмотрены возрастные изменения во взаимодействии волн ЭЭГ. Предварительные результаты позволяют судить о том, что возрастные изменения диагностируются в разных функциональных состояниях. В частности, они диагностируются как в состоянии бодрствования, так и при разных стадиях сна. Для установления общих закономерностей возрастных изменений нужно увеличивать статистику экспериментальных записей. Полученные результаты могут найти применение в разных областях. Например, понимание механизмов синхронизации ритмов может помочь в разработке новых методов реабилитации после инсультов или при болезни Альцгеймера.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

[1] Александров, М. В. Общая электроэнцефалография / М. В. Александров, Л. Б. Иванов, С. А. Лытаев [и др.]; под ред. М. В. Александрова. — СПб.: Стратегия будущего, 2017. — 128 с.

[2] Антропова, Л. К. Физиология высшей нервной деятельности и сенсорных систем: учебное пособие / Л. К. Антропова. — Новосибирск: НГТУ, 2022. — 80 с.

[3] Белов, В. В. Нейрофизиология: учебное пособие / В. В. Белов, А. А. Лебедев. — Санкт-Петербург: ИЭО СПбУТУиЭ, 2012. — 215 с. Grossman, A. Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape. / A. Grossman, J. Morlet // SIAM Journal on Mathematical Analysis. - 1984. - №15. - С. 723-736.