

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

Кафедра физики открытых систем

Изучение особенностей динамики ЭЭГ у людей во время сна

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 4041 группы

направления 09.03.02 «Информационные системы и технологии»

код и наименование направления

Института физики

наименование факультета

Волковой Таисии Николаевны

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

профессор, д. ф-м. н.,
профессор

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А. Н. Павлов

Инициалы Фамилия

Заведующий кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.А.Короновский

Инициалы Фамилия

Саратов 2026 год

Введение. Сон представляет собой сложное физиологическое состояние, обеспечивающее восстановление энергетических ресурсов организма, регуляцию обменных процессов и поддержание нормального функционирования центральной нервной системы. Существенную роль в изучении сна играет анализ электроэнцефалографических сигналов (ЭЭГ), позволяющий исследовать особенности нейронной активности на различных стадиях сна и выявлять изменения, связанные с патологическими состояниями.

Одним из наиболее распространённых нарушений сна является синдром обструктивного апноэ сна (СОАС), характеризующийся повторяющимися эпизодами нарушения дыхания во время сна, сопровождающимися интермиттирующей гипоксией и фрагментацией структуры сна. Подобные нарушения оказывают влияние на функционирование головного мозга и могут приводить к изменениям электроэнцефалографической активности. В связи с этим поиск количественных показателей, позволяющих выявлять особенности организации ЭЭГ у пациентов с СОАС, представляет значительный научный и практический интерес.

Традиционные методы анализа ЭЭГ основаны преимущественно на исследовании спектральной мощности отдельных ритмов. Однако такой подход не всегда позволяет выявить изменения общей организации мозговой активности. Перспективным направлением является использование энтропийных методов анализа, позволяющих количественно оценивать сложность сигнала и особенности распределения активности между различными ритмами ЭЭГ.

Целью выпускной квалификационной работы является исследование особенностей электроэнцефалографической активности во время сна у пациентов с синдромом обструктивного апноэ сна на основе спектрального и энтропийного анализа ЭЭГ-сигналов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: изучены физиологические особенности сна и современные методы его исследования; рассмотрены основные характеристики электроэнцефалографических сигналов и методы спектрального анализа; выполнен анализ спектральной мощности основных ритмов ЭЭГ на различных стадиях сна; проведён энтропийный анализ отдельных ритмов ЭЭГ; реализован подход, основанный на анализе энтропии спектрального профиля распределения мощности между ритмами; выполнено сравнение характеристик ЭЭГ здоровых испытуемых и пациентов с синдромом обструктивного апноэ сна с использованием статистических методов анализа.

В качестве исходных данных использовались записи ночной полисомнографии здоровых добровольцев и пациентов с синдромом обструктивного апноэ сна. Анализ проводился для электроэнцефалографических каналов Fp1, Fp2, C3, C4, O1 и O2, соответствующих лобным, центральным и затылочным областям коры головного мозга. Для исследования использовались данные о стадиях сна, представленные в виде гипнограмм, а также спектральные характеристики основных ритмов ЭЭГ.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, двух основных глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Во второй главе рассмотрены физиологические основы сна, характеристики ЭЭГ-сигналов, методы спектрального и энтропийного анализа, а также особенности организации электроэнцефалографической активности при синдроме обструктивного апноэ сна. Третья глава посвящена обработке и анализу экспериментальных данных, исследованию спектральных и энтропийных характеристик ЭЭГ и сравнению результатов для здоровых испытуемых и пациентов с СОАС.

Основное содержание работы. В первой главе выпускной квалификационной работы рассмотрены физиологические основы сна, особенности электроэнцефалографической активности головного мозга, методы спектрального анализа ЭЭГ-сигналов и энтропийные подходы к исследованию биомедицинских данных.

Сон является сложным физиологическим процессом, необходимым для нормального функционирования центральной нервной системы и поддержания общего состояния организма. В соответствии с современной классификацией выделяют стадии медленного сна (N1, N2, N3) и быстрого сна (REM). Каждая стадия характеризуется специфическими особенностями биоэлектрической активности головного мозга, которые могут быть зарегистрированы с помощью электроэнцефалографии.

Электроэнцефалография является одним из основных методов исследования функционального состояния головного мозга. ЭЭГ представляет собой запись электрической активности нейронных ансамблей коры головного мозга и позволяет анализировать особенности протекания различных физиологических процессов. В структуре ЭЭГ выделяют несколько основных частотных диапазонов: дельта-ритм (0,5-4 Гц), тета-ритм (4-8 Гц), альфа-ритм (8-13 Гц), бета-ритм (13-30 Гц) и гамма-ритм (свыше 30 Гц). Соотношение мощностей указанных ритмов изменяется в зависимости от функционального состояния организма и стадии сна.

Особое внимание в работе уделено синдрому обструктивного апноэ сна (СОАС), представляющему собой распространённое нарушение дыхания во время сна. Данное заболевание сопровождается повторяющимися эпизодами частичной или полной обструкции верхних дыхательных путей, приводящими к снижению уровня насыщения крови кислородом и нарушению структуры сна. Повторяющиеся эпизоды гипоксии и микропробуждений оказывают влияние на функционирование

головного мозга и могут отражаться в характеристиках электроэнцефалографических сигналов.

Для исследования особенностей организации ЭЭГ применялись методы спектрального анализа. Данный подход позволяет количественно оценивать распределение энергии сигнала между различными частотными диапазонами и выявлять характерные изменения структуры ЭЭГ при различных функциональных состояниях. Кроме того, в работе использовались энтропийные методы анализа, основанные на расчёте энтропии Шеннона. Энтропия рассматривается как количественная мера сложности и упорядоченности исследуемой системы и позволяет оценивать особенности организации колебательной активности головного мозга.

Во второй главе представлены результаты практического исследования. В качестве исходных данных использовались записи электроэнцефалограмм здоровых испытуемых и пациентов с синдромом обструктивного апноэ сна. Для анализа были выбраны каналы Fp1, Fp2, C3, C4, O1 и O2, отражающие активность лобных, центральных и затылочных отделов коры головного мозга.

Исходные ЭЭГ-сигналы характеризуются выраженной нестационарностью. Их статистические характеристики изменяются во времени вследствие естественной смены стадий сна. Кроме того, записи содержат артефакты, обусловленные движениями пациента, морганием, мышечной активностью и особенностями контакта электродов с поверхностью кожи головы. Для уменьшения влияния случайных колебаний дальнейший анализ выполнялся по эпохам сна фиксированной длительности.

Для сопоставления характеристик ЭЭГ с физиологическим состоянием испытуемых использовались гипнограммы сна. Каждая эпоха была отнесена к одной из стадий: бодрствование (Wake), быстрый сон (REM), а также стадии медленного

сна N1, N2 и N3. Такой подход позволил анализировать изменения исследуемых показателей как во времени, так и в зависимости от стадии сна.

Первым этапом исследования являлся спектральный анализ ЭЭГ-сигналов. Для каждого анализируемого фрагмента определялись спектральные мощности основных физиологически значимых ритмов. Помимо абсолютных значений мощности рассчитывались относительные мощности, характеризующие вклад каждого ритма в суммарную мощность сигнала.

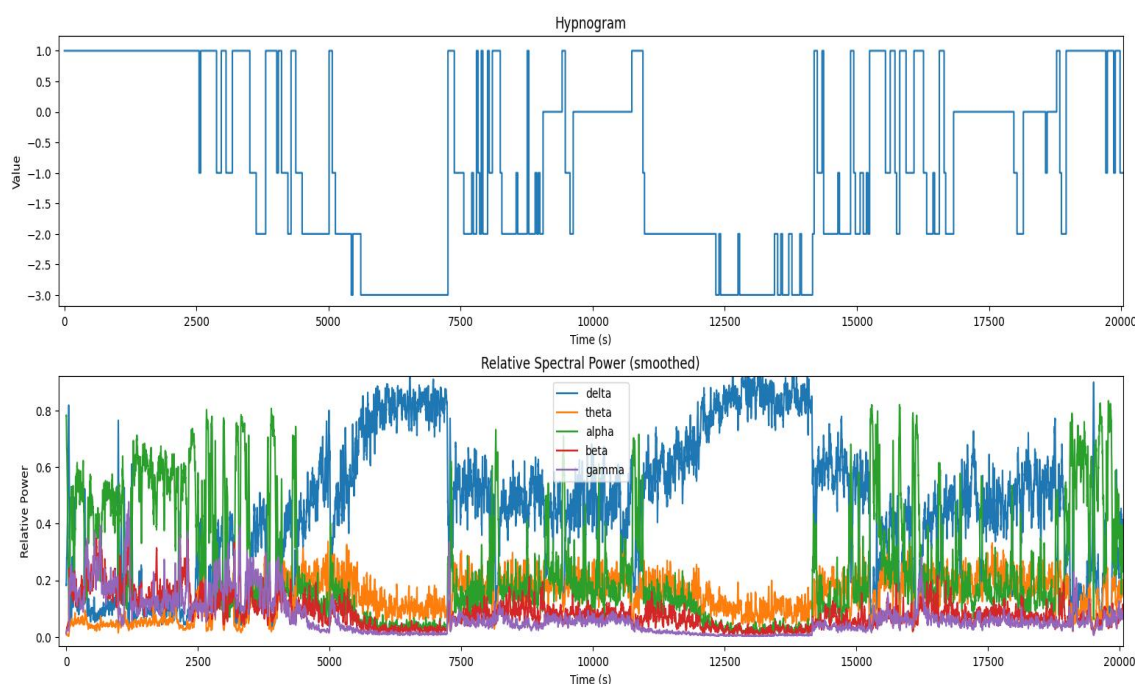


График 1. Пример относительного спектра мощности ЭЭГ - сигнала.

Полученные результаты показали наличие выраженной зависимости распределения энергии между частотными диапазонами от стадии сна. Наиболее существенные изменения наблюдались для дельта-ритма. В периоды глубокого сна N3 его относительная мощность значительно возросла, что соответствует физиологическим особенностям данной стадии. Увеличение вклада медленноволновой активности сопровождалось уменьшением относительной мощности более высокочастотных компонентов сигнала.

Тета-ритм демонстрировал умеренные изменения и наиболее отчётливо проявлялся в переходных стадиях сна. Альфа-ритм характеризовался более высокими значениями в периоды бодрствования и постепенно уменьшался по мере углубления сна. Вклад бета- и гамма-ритмов оставался сравнительно небольшим на протяжении большей части ночной записи.

Полученные результаты подтвердили наличие тесной связи между стадией сна и распределением мощности между ритмами ЭЭГ. Именно эта особенность послужила основанием для дальнейшего использования энтропийных методов анализа.

Следующим этапом исследования являлся анализ энтропии отдельных ритмов ЭЭГ. Для каждого ритма рассчитывалась энтропия Шеннона по временным рядам относительной спектральной мощности. Энтропия в данном случае характеризует степень сложности и разнообразия изменений мощности соответствующего ритма во времени.

Анализ проводился отдельно для различных стадий сна и различных областей головного мозга. Рассматривались лобные, центральные и затылочные каналы, что позволяло оценить пространственные особенности организации электрической активности мозга.

Проведённый анализ показал, что значения энтропии существенно зависят как от стадии сна, так и от принадлежности испытуемого к исследуемой группе. Для здоровых испытуемых наблюдалась тенденция к увеличению энтропии в фазе REM по сравнению со стадиями медленного сна. Особенно отчётливо данная закономерность проявлялась для альфа-ритма.

Увеличение энтропии свидетельствует о возрастании сложности временной структуры сигнала и отражает более разнообразную организацию нейронной активности в период быстрого сна. Полученный результат согласуется с

современными представлениями о физиологии REM-сна, который характеризуется высокой активностью коры головного мозга и сложной организацией нейронных процессов.

Для пациентов с синдромом обструктивного апноэ сна наблюдалась иная картина. В ряде случаев значения энтропии в фазе REM оказывались ниже соответствующих значений для стадий медленного сна. Наиболее заметно данная тенденция проявлялась в затылочных отведениях и для альфа-ритма. Полученные результаты могут свидетельствовать о нарушении нормальной организации колебательной активности головного мозга при наличии патологии.

Для анализа энтропии отдельных ритмов были построены соответствующие графики распределения значений по каналам и стадиям сна. Они позволили наглядно сравнить исследуемые группы и подтвердили наличие различий между здоровыми испытуемыми и пациентами с СОАС. Однако данные графические материалы в автореферат не включаются в связи с ограничениями по объёму.

Несмотря на выявленные различия, анализ отдельных ритмов не позволил обнаружить устойчивые закономерности одновременно для всех каналов и стадий сна. Полученные результаты в значительной степени зависели от выбора ритма и локализации исследуемого канала.

С целью получения более интегральной характеристики организации электроэнцефалографической активности был реализован второй подход, основанный на анализе энтропии профиля распределения мощности между ритмами.

Для каждой эпохи сна вычислялись относительные мощности основных ритмов ЭЭГ. Полученный набор относительных мощностей рассматривался как спектральный профиль эпохи. Далее рассчитывалась нормированная энтропия Шеннона, характеризующая степень равномерности распределения энергии между частотными диапазонами.

Если энергия концентрируется преимущественно в одном диапазоне частот, энтропия уменьшается. Если мощности различных ритмов становятся сопоставимыми, значение энтропии возрастает. Таким образом, данный показатель позволяет количественно оценивать степень упорядоченности распределения энергии между ритмами головного мозга.

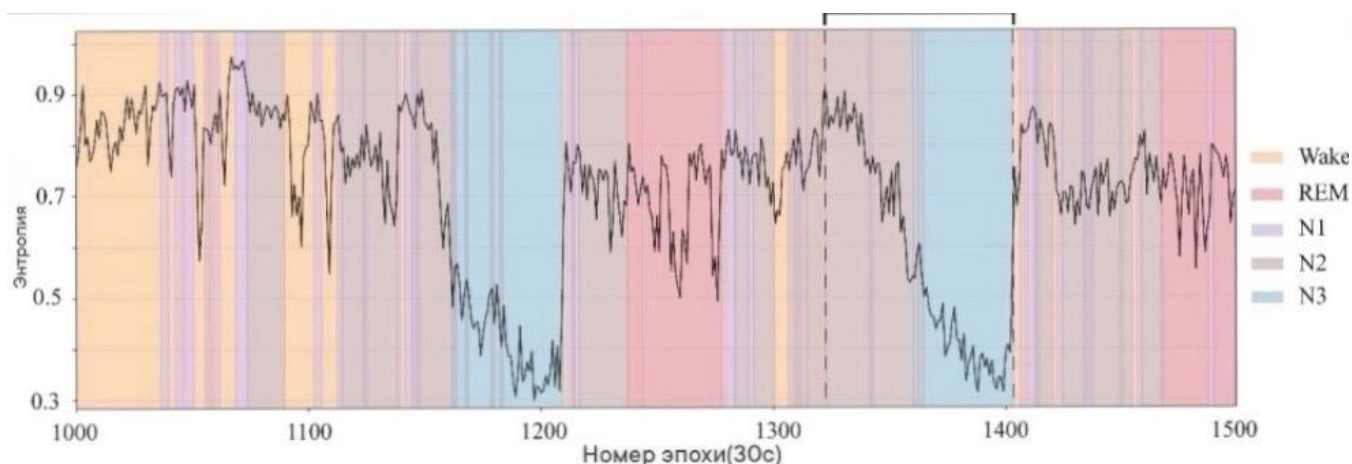


График 2. Характерная зависимость значений энтропии (чёрная линия) от номера эпохи сна по каналу O1 по данным одного из добровольцев. Цветом фона обозначены стадии сна: стадия Wake - жёлтым цветом, стадия REM - красным, N1 - фиолетовым, N2 - коричневым, N3 - синим.

Анализ временной динамики энтропии показал её тесную связь со стадийной структурой сна. Минимальные значения энтропии наблюдались в периоды глубокого сна N3. Это свидетельствует о доминировании низкочастотной активности и концентрации энергии в ограниченном наборе частотных диапазонов.

Особый интерес представлял переход от стадии N2 к стадии N3. На данном участке наблюдалось постепенное снижение энтропии, отражающее усиление вклада медленноволновой активности и формирование более упорядоченной структуры спектра ЭЭГ.

При выходе из глубокого сна наблюдалась противоположная картина. Рост энтропии происходил значительно быстрее, чем её снижение при переходе к стадии

N3. Это свидетельствует о быстром перераспределении энергии между различными ритмами и восстановлении более сложной организации колебательной активности.

Даже внутри одной стадии сна сохранялась определённая вариабельность значений энтропии. Наиболее широкий диапазон изменений был характерен для стадии N2, что соответствует её промежуточному положению между поверхностным и глубоким сном.

Для более детального исследования межгрупповых различий были дополнительно построены распределения вероятности значений энтропии для различных стадий сна. Проведённый анализ показал наличие устойчивых различий между здоровыми испытуемыми и пациентами с синдромом обструктивного апноэ сна. Для пациентов были характерны более узкие распределения значений энтропии, тогда как у здоровых испытуемых наблюдалась большая вариабельность исследуемого показателя. Соответствующие графические материалы в автореферат не включаются.

Для количественной оценки выявленных различий использовался непараметрический критерий Манна-Уитни. Выбор данного метода обусловлен особенностями электроэнцефалографических данных, распределение которых зачастую отличается от нормального закона и может содержать выбросы.

Поскольку сравнение проводилось одновременно для нескольких каналов и стадий сна, дополнительно применялась коррекция на множественные сравнения методом Бенджамини-Хохберга, основанная на контроле доли ложных обнаружений).

Результаты статистического анализа подтвердили наличие значимых различий между исследуемыми группами. Наиболее выраженные различия были обнаружены в правой лобной области (канал Fp2). Для стадий N1, N2 и REM были получены

значения $p < 0,01$, свидетельствующие о высокой статистической значимости различий между здоровыми испытуемыми и пациентами с СОАС.

Схожие результаты были получены для правого центрального канала С4. В затылочных областях устойчивые статистически значимые различия наблюдались для каналов О1 и О2, особенно в фазе быстрого сна.

В то же время для каналов Fp1 и С3 статистически значимых различий выявлено не было. Данный результат может свидетельствовать о пространственной неоднородности изменений мозговой активности, связанных с синдромом обструктивного апноэ сна.

Полученные результаты согласуются с визуальным анализом распределений энтропии и подтверждают существование устойчивых различий в организации колебательной активности головного мозга между здоровыми испытуемыми и пациентами с синдромом обструктивного апноэ сна.

В целом проведённое исследование показало, что анализ энтропии профиля распределения мощности между ритмами обладает большей чувствительностью к изменениям структуры сна по сравнению с анализом энтропии отдельных ритмов. Использование данного подхода позволяет более эффективно выявлять особенности организации мозговой активности при синдроме обструктивного апноэ сна и может рассматриваться как перспективное направление дальнейших исследований в области анализа ЭЭГ-сигналов.

Заключение. В ходе выполнения выпускной квалификационной работы проведено исследование особенностей электроэнцефалографической активности у здоровых испытуемых и пациентов с синдромом обструктивного апноэ сна на основе методов спектрального и энтропийного анализа.

В работе рассмотрены физиологические особенности сна, основные характеристики электроэнцефалографических сигналов и современные подходы к их обработке. Изучены возможности применения спектрального анализа и энтропии Шеннона для исследования структуры сна и особенностей организации мозговой активности.

На основе записей электроэнцефалограмм здоровых испытуемых и пациентов с синдромом обструктивного апноэ сна были рассчитаны относительные спектральные мощности основных ритмов ЭЭГ. Проведённый анализ показал наличие выраженной зависимости распределения мощности между частотными диапазонами от стадии сна. Наиболее существенные изменения наблюдались для дельта-ритма, мощность которого возрастала в периоды глубокого сна.

В работе реализованы два подхода к энтропийному анализу ЭЭГ-сигналов. Первый подход основывался на анализе энтропии отдельных ритмов ЭЭГ. Полученные результаты показали зависимость энтропийных характеристик как от стадии сна, так и от принадлежности испытуемого к исследуемой группе.

Второй подход основывался на анализе энтропии профиля распределения мощности между основными ритмами ЭЭГ. Установлено, что значения энтропии изменяются в соответствии со стадийной структурой сна: минимальные значения характерны для стадии глубокого сна N3, а более высокие наблюдаются во время REM-сна и бодрствования.

Статистический анализ с использованием критерия Манна-Уитни выявил значимые различия между здоровыми испытуемыми и пациентами с синдромом

обструктивного апноэ сна для ряда каналов и стадий сна. Наиболее выраженные различия были обнаружены для каналов Fp2, C4, O1 и O2.

Полученные результаты показывают, что энтропия профиля распределения мощности между ритмами является более информативной характеристикой по сравнению с энтропией отдельных ритмов и позволяет выявлять особенности организации сна, связанные с синдромом обструктивного апноэ сна.

Список литературы

1. Руннова А. Е., Симонян М. А., Романова Е. В. и др. Междисциплинарные подходы к исследованию ночного сна: физиология сна и цифровые технологии обработки полисомнографии: учебное пособие. - Саратов: Саратовский университет, 2022. - ISBN 978 - 5 - 00 - 207 - 552 - 2.
2. Kryger M. H., Roth T., Dement W. C. Principles and Practice of Sleep Medicine. - 7th ed. - Elsevier, 2022.
3. Cohen M. X. Analyzing Neural Time Series Data. - MIT Press, 2022.
4. Shannon C. E. A mathematical theory of communication. // Bell System Technical Journal. - 1948.
5. Humeau - Heurtier A. Complexity metrics for EEG signals: a review. // Entropy. - 2021.
6. Abásolo D. et al. EEG entropy analysis in neurological disorders. // Frontiers in Neuroscience. - 2022.