

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИВНД и НФ РАН,
д.б.н., профессор РАН
А.Ю. Малышев



« 2 » августа 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Пицик Елены Николаевны «Особенности и возрастные изменения сенсомоторной интеграции в мозге человека: рекуррентный анализ ЭЭГ», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.5.2. - Биофизика

Диссертационная работа Пицик Елены Николаевны посвящена исследованию характеристик электрической активности головного мозга во время выполнения движений, а также на выявление различий этих характеристик у людей разных возрастных групп для поиска возрастных изменений функционирования сенсомоторной системы головного мозга. В качестве основного метода исследования электрической активности мозга используется регистрация электроэнцефалограммы (ЭЭГ) и ее рекуррентный анализ.

Актуальность работы определяется направленностью исследования на расширение имеющихся представлений о нейрофизиологических характеристиках сенсомоторной интеграции и возрастных изменениях в функционировании сенсомоторной системы головного мозга, что открывает возможности для разработки систем детектирования и классификации паттернов электрической активности головного мозга, связанных с движениями, для применения в интерфейсах мозг-компьютер с биологической обратной связью для нейрореабилитации после инсультов, травм, и нейродегенеративных заболеваний.

Целью работы является изучение особенностей сенсомоторной интеграции в мозге человека, а также возрастных изменений функционирования сенсомоторной коры мозга, выявляемым с помощью рекуррентного анализа сложности сигналов электроэнцефалограммы.

Содержание работы

Во **введении** дана общая характеристика диссертации, приведено описание современного состояния проблемы и обоснована актуальность и научная новизна работы, сформулированы цель и методы исследования, изложены научная концепция диссертации, основные результаты работы, её практическая ценность, положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы и основных публикациях.

Первая глава содержит обзор современного состояния исследований сенсомоторной интеграции. Рассмотрены физиологические основы сенсомоторной интеграции. Описаны существующие представления о влиянии здорового старения на электрическую активность головного мозга. Приведено описание традиционных методов и подходов к исследованию сенсомоторной интеграции, а также их ограничения. Описан рекуррентный анализ и его преимущества перед другими известными методами анализа сигналов ЭЭГ в контексте двигательной активности и сенсомоторной интеграции.

Вторая глава посвящена исследованию динамических свойств сигналов ЭЭГ во время выполнения движений и сенсомоторной интеграции. Подробно описан нейрофизиологический эксперимент, направленный на формирование массива данных ЭЭГ,

связанных с выполнением движений по звуковому сигналу. К полученным записям ЭЭГ был применен узкополосный частотный фильтр, оставляющий сигнал в альфа-диапазоне (8-14 Гц). Отфильтрованные записи обрабатывались далее при помощи рекуррентного анализа с использованием мер сложности, детерминизма и энтропии рекуррентного времени. Было показано, что при совершении движения наблюдается билатеральное снижение сложности сигнала ЭЭГ в выбранном частотном диапазоне, а меры детерминизма и энтропии рекуррентного времени обладают достаточной чувствительностью для осуществления детектирования движений на отдельных фрагментах сигналов ЭЭГ. Рекуррентный анализ был также применен для обнаружения вызванного потенциала Р300, являвшегося реакцией на звуковой сигнал к выполнению движения. Показано, что возникновение потенциала Р300 связано с локализованным во времени увеличением сложности сигналов ЭЭГ, при этом описанный подход позволяет осуществлять детектирование ВП на отдельных фрагментах записи ЭЭГ.

Третья глава посвящена исследованию возрастных изменений в электрической активности головного мозга, связанной с сенсомоторной интеграцией. Исследовались записи ЭЭГ, полученные при совершении движений у пожилых людей и людей из контрольной группы. Была обнаружена корреляция между сложностью предстимульных сигналов ЭЭГ с выраженностью десинхронизации мю-ритма, при этом для группы пожилых испытуемых характерно сочетание повышенной сложности сигналов ЭЭГ со слабой десинхронизацией мю-ритма. Далее были проанализированы различия в скорости нейронной реакции на совершение движений, оцененное как первый минимум десинхронизации мю-ритма во время совершения движения рукой. Скорость нейронной реакции в группе молодых испытуемых значительно выше при движении ведущей рукой, в то время как у пожилых испытуемых наблюдается одинаково сниженное значение данного параметра для обеих рук. Кроме того, выполнение движения по команде связано с повышенной активацией тета-ритма (4-8 Гц) в группе пожилых испытуемых, что, по мнению автора, может быть объяснено моделью сенсомоторной интеграции Бланда. Помимо рекуррентного и частотно-временного анализа проводился анализ сети функциональных связей с помощью искусственной нейронной сети, который показал более сильную активацию связей в лобной, теменной долях и моторной коре.

Четвертая глава содержит описание способов детектирования и классификации двух типов движений и вызванного потенциала Р300 с помощью рекуррентного анализа. Для проведения данного исследования был разработан дизайн нейрофизиологического эксперимента, включавшего сессию выполнения произвольных движений руками без команды. С помощью частотного фильтра из сигналов ЭЭГ, соответствующих выполнению движений руками, была выделена частотная компонента, соответствующая мю-ритму, после чего с помощью рекуррентного анализа были выделены характеристики сложности данных сигналов. Показано, что детектирование движений руками с помощью меры рекуррентной плотности возможна в плавающем окне, при этом выделенные характеристики сложности зависят от латеральности полушария по отношению к руке, движение которой выполняется. Это позволило различить движения правой и левой рукой. На втором этапе был проанализирован массив сигналов ЭЭГ, записанных во время выполнения движений по команде, и описан способ детектирования вызванных потенциалов Р300 на этих сигналах при помощи меры энтропии рекуррентного времени. Описанный способ детектирования эффективен в случаях, когда форма волны ЭЭГ не показывает возникновения Р300 на отдельных отрезках сигналов ЭЭГ.

В **заключении** перечислены основные результаты диссертационной работы.

Научная новизна диссертации состоит в следующем:

1. Исследованы динамические характеристики электрической активности головного мозга человека, связанных с выполнением движений, с помощью рекуррентного анализа сигналов ЭЭГ.

2. На основе характеристик сложности сигналов ЭЭГ, связанных с процессом сенсомоторной интеграции, был разработан способ классификации движений левой и правой рукой, основанный на различии выбранных мер рекуррентного анализа в зависимости от латеральности полушария по отношению к руке, движение которой выполняется. Предложенный способ позволяет различать два типа движений в зависимости от значений сложности сигналов ЭЭГ в разных полушариях мозга.

3. Разработан способ детектирования вызванного потенциала Р300 на основе рекуррентного времени. Показано, что предлагаемый способ детектирования позволяет выявить потенциал Р300 на отдельных записях ЭЭГ в случаях, когда традиционный способ оказывается неэффективным.

4. Установлена зависимость между сложностью сигналов ЭЭГ в период времени, предшествующей движению, и выраженностью двигательного паттерна у молодых (25.5 ± 5.2 лет) и пожилых (65 ± 7.1 лет) испытуемых. Было показано, что сложность постстимульных сигналов ЭЭГ, посчитанная с помощью рекуррентного анализа, снижается с возрастом и связана с менее выраженной десинхронизацией мю-ритма ЭЭГ во время выполнения движений.

5. Разработан способ восстановления сети функциональных связей головного мозга на основе искусственной нейронной сети. Показано, что выполнение движений в группе пожилых испытуемых связано с усилением связей между областями в интервалы времени, соответствующие движениям, в тета- (4-8 Гц) и альфа- (8-14 Гц) диапазоне.

Научные результаты и положения, выносимые на защиту, обоснованы и в достаточной степени защищены. Исследования проведены с участием достаточного количества добровольцев.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы

Теоретическая значимость работы обусловлена важностью полученных Е.Н. Пицик результатов рекуррентного анализа сигналов ЭЭГ во время совершения человеком движений, а также выявлением возрастных особенностей электрической активности головного мозга, связанной с сенсомоторной интеграцией. Полученные результаты имеют практическую значимость, поскольку способствуют развитию направления науки, связанного с разработкой систем классификации электрической активности головного мозга в режиме реального времени для управления внешними устройствами и нейрореабилитации двигательных функций.

Личный вклад автора

В рамках выполнения диссертационного исследования автор принимал непосредственное участие во всех этапах проведенных исследований: от реализации поставленных научным руководителем задач до обсуждения результатов и написания статей.

Автореферат диссертации Пицик Е.Н. Полностью соответствует содержанию диссертационной работы и оформлен в соответствии с предъявляемыми требованиями. Выводы, представленные в автореферате, полностью соответствуют выводам, приведенным в диссертации.

Публикации по теме диссертации представлены в 25 научных работах, из них 10 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus, 11 тезисов в трудах всероссийских и международных конференций индексируемых в системах цитирования Web of Science и/или Scopus, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и 1 свидетельство о регистрации патента на изобретение.

Замечания по содержанию диссертации

К работе имеется несколько вопросов и замечаний.

1. В представлении результатов работы следовало бы уделить большее внимание преимуществам рекуррентного анализа по сравнению со стандартными методами анализа ЭЭГ.

2. В четвертой главе автореферата следовало бы привести показатели точности классификации движений левой и правой руки при помощи предложенного метода. Было бы желательно сравнить эти показатели с результатами, полученными при помощи другого метода классификации. Имея в виду достаточно большое количество методов, предложенных для классификации паттернов ЭЭГ, соответствующих выполнению и кинестетическому представлению движений, можно было бы сравнить рекуррентный анализ и метод Common Spatial Patterns с последующим дискриминантным анализом, поскольку метод CSP является одним из наиболее популярных методов пространственной фильтрации при выделении векторов особенностей в области ИМК.

3. Следовало бы подробнее объяснить смысл выбранных мер сточки зрения физиологии или хотя бы свойств сигнала, понятных исследователю, привыкшему иметь дело с ЭЭГ. В частности, находится ли в контексте исследования мера сложности сигнала в прямой зависимости от наличия или отсутствия всплеск ритмической активности, наблюдаемой на электроде, или она позволяет определить нечто большее? Почему, по мнению автора, изменение сложности ЭЭГ в диапазоне 150-400мс от звукового сигнала свидетельствует о наличии потенциала P300, когда по форме волны ЭЭГ этого сказать нельзя?

Представленные вопросы и замечания касаются представления результатов и их обсуждения и не влияют на достоверность и обоснованность положений, выносимых на защиту.

Заключение

Актуальность темы исследований, новизна полученных результатов, высокий научный уровень работы, её теоретическая и практическая значимость позволяют сделать заключение о том, что диссертационная работа Пицик Елены Николаевны «Особенности и возрастные изменения сенсомоторной интеграции в мозге человека: рекуррентный анализ ЭЭГ» отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.5.2. - Биофизика.

Отзыв обсужден и единогласно утвержден на семинаре ИВНД и НФ РАН 25.07.2022.

Сведения о составителе отзыва:

Бобров Павел Дмитриевич, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией математической нейробиологии обучения ИВНД и НФ РАН.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное учреждение науки Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН.

Адрес: 117485, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 5А.

Официальный сайт: <https://www.ihna.ru>

Электронная почта: admin@ihna.ru

Тел.: (495) 334-70-00



Отзыв составил:

Заведующий лабораторией математической нейробиологии обучения ИВНД и НФ РАН,
к.б.н.

Подпись Боброва П.Д. заверяю




Бобров П.Д.

Подпись т. 
УДОСТОВЕРЯЮ
Зав. канц. ИВНД и НФ 
(Кузнецова Т.И.)