

## ОТЗЫВ

официального оппонента,

доктора физико-математических наук, проректора по научной работе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского"

Иванченко Михаила Васильевича

**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**

В диссертационной работе Пицик Елены Николаевны представлены новые результаты исследований в области сенсомоторной интеграции и возрастных изменений в сенсомоторной коре головного мозга при совершении движений по данным электроэнцефалограмм. Актуальность данного исследования определяется высокой социальной значимостью разработок систем ранней диагностики и реабилитации неврологических болезней, связанных с возрастом. Разработка таких систем требует не только применения эффективных математических методов анализа нейрофизиологических сигналов, но и проведения фундаментальных исследований нейронных взаимодействий, лежащих в основе сенсомоторной интеграции и совершения движений.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введений, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 143 страницы.

### **Характеристика содержания работы**

Во **введении** сформулированы цель и задачи исследования, обосновывается актуальность, научная и практическая значимость результатов, а также представлены основные научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен обзор современных исследований сенсомоторной интеграции и возрастных изменений функционирования головного мозга. Рассмотрены традиционные методов исследования сенсомоторной интеграции, указаны их преимущества и недостатки. Описаны современные представления возрастных изменениях в электрической активности коры головного мозга. Описан рекуррентный анализ и его преимущества при анализе сигналов ЭЭГ.

**Вторая глава** содержит описание результатов рекуррентного анализа сигналов ЭЭГ, записанных во время выполнения движений. Меры рекуррентного анализа были применены к сигналам ЭЭГ для выявления нейрофизиологических паттернов, соответствующих выполнению простых двигательных задач. Показано, что выполнение движения вызывает снижение сложности сигналов ЭЭГ, отфильтрованных в диапазоне сенсомоторного ритма (8-14 Гц). Применённые меры обладают свойством контралатеральности, что позволяет различать два типа движений (левой и правой рукой) на основе различий в нейронной реакции в контралатеральных полушариях моторной коры головного мозга, при этом указанные различия могут быть обнаружены на отдельных фрагментах записи ЭЭГ. Показано, что возникновение потенциала Р300 связано с локализованным во времени увеличением сложности сигналов ЭЭГ, при этом описанный подход позволяет осуществлять детектирование на отдельных фрагментах записи ЭЭГ.

**Третья глава** содержит результаты исследований изменений свойств сигналов ЭЭГ, связанных с возрастом. Рассмотрены процессы, связанные с сенсомоторной интеграцией и подготовкой к выполнению движений. Выявлена зависимость между сложностью предстимульных сигналов ЭЭГ и выраженностью десинхронизации  $\mu$ -ритма (8-14 Гц) во время совершения движений с помощью рекуррентного и частотно-временного анализа, соответственно. Показано, что для группы пожилых испытуемых характерно сочетание повышенной сложности сигналов ЭЭГ со слабой десинхронизацией  $\mu$ -ритма. На втором этапе исследования показано, что выполнение движения по команде в группе пожилых испытуемых происходит в соответствии с моделью сенсомоторной интеграцией Бланда, заключающейся в повышенной активации  $\theta$ -ритма (4-8 Гц). Приведен анализ сетей функциональных связей с помощью искусственной нейронной сети, показавшим более сильную активацию связей в лобной, теменной долях и моторной коре в группе пожилых испытуемых.

В **четвёртой главе** описаны способы детектирования и классификации двух типов движений и вызванного потенциала Р300 с помощью рекуррентного анализа сигналов ЭЭГ. Показаны результаты успешной классификации двух типов движений (левой и правой рукой) для отдельных эпох ЭЭГ. Помимо этого, показано, что меры рекуррентного анализа позволяют осуществлять детектирование вызванных потенциалов Р300, возникающих в ответ на звуковой стимул к совершению движений.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования.

Положения, выносимые на защиту, вполне обоснованы. Результаты, полученные в диссертации, характеризуются научной новизной и значимостью. Как наиболее важные и

интересные с научной точки зрения хотелось бы выделить следующие результаты. С помощью рекуррентного анализа выявлено, что движения левой и правой рукой связаны с контралатеральным снижением сложности сигналов ЭЭГ в диапазоне  $\mu$ -ритма (8-14 Гц). Показано, что подготовка к выполнению движений в группе пожилых испытуемых связана с всплеском нейронной активности в  $\theta$ -ритме в центральной, центрально-теменной и теменной областях мозга, и здоровое старение связано со снижением скорости нейронной реакции на совершаемое движение в моторных ритмах ЭЭГ ( $\mu$  (8-14 Гц) и  $\beta$  (15-25 Гц)). Показано, что существует корреляция между сложностью предстимульных сигналов ЭЭГ с десинхронизацией  $\mu$ -ритма при совершении движения, при этом для пожилой группы испытуемых характерно возрастное снижение сложности сигналов ЭЭГ в сочетании с ослабленной вызванной десинхронизацией. Наконец, показано, что вызванный потенциал P300 связан с увеличением сложности сигналов ЭЭГ, при этом мера энтропии рекуррентного времени позволяет осуществлять детектирование потенциала P300 в случаях, когда традиционные методы оказываются неэффективными. Полученные результаты имеют **практическую значимость** для разработки систем реабилитации и раннего детектирования возрастных неврологических заболеваний. Система детектирования в реальном времени потенциалов P300 на основе рекуррентного анализа представляет интерес в разработке различных интерфейсов мозг-компьютер.

**Достоверность** и **обоснованность** полученных результатов обеспечивается использованием ряда методов и подходов, широко применяемых в современных научных исследованиях. Результаты соответствуют современным биофизическим и нейронаучным представлениям, верифицированы с помощью статистических методов. Диссертация полностью соответствует специальности 1.5.2. — Биофизика (физико-математические науки).

К диссертации имеются следующие **вопросы** и **замечания**:

1. В главе 1 описывается несколько подходов к определению рекуррентного порога, однако в результате остается неясным, какой из них был выбран автором.

2. В главе 2 обсуждаются асимметричные характеристики сигналов ЭЭГ в различных полушариях в зависимости от конкретной руки, которая совершает при этом движение. Вместе с тем, вопрос о наличии асимметрии, связанной с праворукостью испытуемых, не получил освещения.

3. В главе 3 используются определения «влияние здорового старения», «биомаркеры здорового старения», «эффекты здорового старения» и т.п., которые представляются не вполне корректными, поскольку в выборке отсутствуют испытуемые с диагностированными патологиями. Таким образом, на основе имеющихся данных не представляется возможным

сделать вывод о специфичности наблюдаемых возраст-зависимых изменений характеристик ЭЭГ именно для «здорового старения».

4. Автор использует англицизм «генерализованная синхронизация» вместо общепринятого термина «обобщенная синхронизация».

5. В главе 4 недостаточно ясно изложен способ определения рекуррентной плотности базового уровня, возникает вопрос о зависимости результатов метода от способа выбора данной величины.

Указанные замечания не снижают ценности, актуальности и новизны полученных результатов.

Экспериментальные результаты, а также результаты их обработки и выявленные биомаркеры возрастных изменений получены автором **впервые**. Диссертационная работа Пицик Е.Н. представляет собой законченное научное исследование. Работа хорошо структурирована и написана грамотным научным языком. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Полученные в диссертационной работе результаты опубликованы 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.

Диссертационная работа Пицик Е.Н. «Особенности и возрастные изменения сенсомоторной интеграции в мозге человека: рекуррентный анализ ЭЭГ» удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.5.2. - Биофизика.

Доктор физико-математических наук,  
Проректор по научной работе Федерального государственного  
автономного образовательного учреждения  
высшего образования "Национальный  
исследовательский Нижегородский  
государственный университет им. Н.И. Лобачевского"

Иванченко М.В.

«05» 10 2022 г.

Адрес места работы: НИИ У им. Н.И. Лобачевского, 603950, г. Нижний Новгород, пр-кт. Гагарина 23, корп. 2;  
тел.: 462-30-04

Можинко Иванченко М.В. заверяю  
У.с.с.с.р. Л.с.с.р.

e-mail:ivanchenko.mv@gmail.com

Научная специальность докторской диссертации Иванченко Михаила Васильевича —  
01.04.03 — Радиофизика.

Подпись д.ф.-м.н. Иванченко Михаила Васильевича удостоверяю