

ОТЗЫВ

официального оппонента,

**кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника
Центра нейроэкономики и когнитивных исследований Института когнитивных
нейронаук ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая
школа экономики»» Захарова Дениса Геннадьевича на диссертационную работу Куца
Александра Константиновича «Влияние неоднозначной визуальной информации на
процессы ее обработки в нейронной сети головного мозга», представленную на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальностям 1.5.2 – Биофизика и 1.2.2 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ**

Актуальность диссертационного исследования

Диссертационная работа Александра Константиновича Куца посвящена одному из самых актуальных, перспективных и быстроразвивающихся направлений современной науки – изучению фундаментальных нейрофизиологических механизмов функционирования мозга. Отмечу, что последние прорывы в этом направлении напрямую связаны с применением экспериментальных физических подходов к изучению такого сложного биологического объекта, как мозг. Соответственно, это проведение подобных исследований в этом направлении требует от специалистов не только прекрасного знания современных нейрофизиологических представлений о мозге и его функционировании, но и превосходного владения основами физического эксперимента и навыками математического моделирования. В частности, в диссертационной работе Александра Константиновича представлены интересные новые результаты исследований в области изучения нейрофизиологических механизмов обработки головным мозгом сенсорной информации с помощью электроэнцефалографии, в том числе в условиях высокой неоднозначности визуальной информации. Актуальность данного исследования, в первую очередь, объясняется высокой значимостью выявления фундаментальных биофизических процессов обработки мозгом сенсорной информации с точки зрения диагностики нормальной и паталогической нейронной активности. При этом понимание биофизических механизмов сенсорной обработки, в свою очередь, поможет создать методы классификации состояний головного мозга при выполнении визуальных когнитивных задач, что может применяться при создании специального типа программного обеспечения и, в частности, систем поддержки принятия врачебных решений. Считаю, что диссертационное исследование Александра Константиновича полностью соответствует специальностям 1.5.2

– Биофизика и 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 142 страницы.

Характеристика содержания работы

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

В **первой главе** диссертации исследуется воздействие неоднозначности на механизмы обработки головным мозгом визуальной информации. Был описан нейрофизиологический эксперимент, в ходе которого испытуемые определяли ориентацию визуальных стимулов с высоким и низким уровнем неоднозначности. В ходе экспериментальных исследований были получены записи электрической активности головного мозга (ЭЭГ). Для выявления отличий в обработке стимулов с разной степенью неоднозначности, проводился анализ мощности ЭЭГ, в результате которого обнаружилось существенные различия в стратегиях обработки головным мозгом визуальных стимулов с различным уровнем неоднозначности. Однозначные визуальные стимулы обрабатываются в зрительной коре головного мозга, при этом при увеличении неоднозначности визуальной информации наблюдается повышение активности в низкочастотном диапазоне (дельта- и тета-ритмы) во фронтальной области головного мозга.

Вторая глава диссертационной работы содержит описание особенностей структуры сигналов ЭЭГ, отражающих изменения уровня концентрации внимания в процессе обработки головным мозгом неоднозначной визуальной информации. В рамках данного исследования была проанализирована мощность сигналов ЭЭГ в альфа- (8–12 Гц) и бета- (15–30 Гц) частотных диапазонах, которые традиционно связываются с концентрацией внимания в литературе на данную тему. Показано, что вейвлетная мощность сигналов в альфа-диапазоне частот (8-12 Гц) снижалась на временном интервале от момента появления визуального стимула до момента, когда испытуемые нажимали кнопку джойстика. В то же время, мощность сигналов ЭЭГ в бета-диапазоне частот (15-30 Гц) повышалась после предъявления визуального стимула. Более интересно, что стимулы с высокой неоднозначностью вызывали повышение мощности сигналов ЭЭГ в бета-диапазоне в лобной области на начальных этапах обработки визуального стимула. Согласно литературе, это может является биомаркером выборочного внимания.

Третья глава диссертации содержит описание свойств сигналов ЭЭГ, которые отражают общее состояние испытуемых, влияющее на эффективность обработки головным

мозгом визуальных стимулов. Было предположено, что при отсутствии внешнего стимула, изменения свойств ЭЭГ отражают в основном внутренние процессы, такие как ментальное состояние. Чтобы вызвать изменения ментального состояния, испытуемые участвовали в длительном экспериментальном исследовании. Показано увеличение мощности ЭЭГ в частотном диапазоне 9-11 Гц в правой теменной зоне головного мозга на интервале времени, предшествующем демонстрации визуального стимула. Это увеличение мощности коррелировало с уменьшением времени принятия решения относительно визуальных стимулов, а также с частотой ошибочных интерпретаций.

В четвертой главе описан разработанный алгоритм и программный комплекс, позволяющие определить пространство признаков на сигналах ЭЭГ для стабильной классификации состояний мозга в процессе обработки неоднозначной визуальной информации. После применения этого комплекса к сигналам ЭЭГ, полученным в ходе восприятия кубов Неккера с разным уровнем неоднозначности, точность классификации составила $74\% \pm 1.6\%$ для тестовой группы, что подтверждает общие пространственно-частотно-временные особенности в группе.

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:

- Показано изменение механизмов обработки головным мозгом визуальной информации при увеличении уровня неоднозначности информации. При низкой неоднозначности визуального стимула наблюдалась высокая мощность сигналов ЭЭГ в затылочной области головного мозга, при этом при увеличении неоднозначности, увеличивалась мощность ЭЭГ в лобной области.
- Впервые показано, что существует корреляция между улучшением поведенческих характеристик (время принятия решения, частота ошибок) во время интерпретации визуальных стимулов с различным уровнем неоднозначности и увеличением мощности ЭЭГ в альфа-диапазоне в теменной области головного мозга, что связывается с процессом нейронной адаптации.
- Выявлены биомаркеры активации выборочного внимания, необходимого для устранения неоднозначности сенсорной информации. Показано, что активация выборочного внимания характеризуется повышением мощности ЭЭГ в бета-диапазоне во фронтальной области головного мозга на начальных этапах обработки визуального стимула.

- Наконец, на основе анализа экспериментальных данных был разработан программный комплекс, позволяющий формировать пространства признаков и классифицировать состояния головного мозга, связанные с обработкой визуальной информации в условиях высокой и низкой неоднозначности. Была разработана математическая модель, основанная на сверточной нейронной сети, обучаемая с использованием сформированного набора признаков.

Полученные результаты обладают высокой **практической значимостью**. В связи с этим хочется отметить алгоритм, основанный на сверточной нейронной сети, позволяющий классифицировать состояния головного мозга во время восприятия сенсорной информации с высоким и низким уровнем неоднозначности. Разработанный алгоритм обладает устойчивостью к вариабельности данных между испытуемыми, а также высокой точностью классификации. Разработанный алгоритм, а также полученные в диссертационной работе фундаментальные научные результаты, могут быть использованы в пассивных интерфейсах мозг-компьютер, осуществляющих мониторинг когнитивного состояния человека. Кроме этого, известно, что нарушения сенсорной обработки наблюдаются при различных заболеваниях центральной нервной системы. Поэтому понимание фундаментальных нейрофизиологических механизмов обработки визуальной информации может быть полезным для разработки систем поддержки принятия врачебных решений.

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.

Тем не менее, к диссертации имеются следующие **вопросы и замечания**:

1. В диссертационной работе есть разночтения в терминологии. Так, например, на рис. 2.5 величина N^- обозначает размер *негативного* кластера, при этом в тексте описывается размер *отрицательного* кластера.

2. В работе не было дано подробного обоснования выбора в качестве математической модели использование сверточной нейронной сети.

3. На протяжении всей диссертационной работы используется англицизм «post-hoc анализ» вместо общепринятого в российской научной литературе термина «апостериорные сравнения».

4. В работе присутствует ряд опечаток, например, «предшествующем» вместо «предшествующем» на странице 23, «наблюдалось» вместо «наблюдалась» на странице 47, «возрастало» вместо «возрастала» на странице 75, «обработкт» вместо «обработке» на

странице 106, на странице 114 отсутствует слово «работы» в словосочетании «диссертационной работы» и т.д.

Указанные замечания касаются только представления материала диссертационного исследования и не снижают научной ценности, актуальности и новизны полученных результатов.

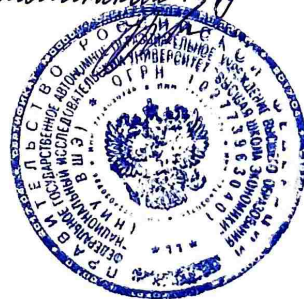
Диссертационная работа Александра Константиновича представляет собой законченное научное исследование. Работа хорошо структурирована и написана ясным научным языком. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Полученные в диссертационной работе результаты опубликованы в 31 научной работе, из них 7 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus, 13 тезисов в трудах всероссийских и международных конференций, индексируемых в системах цитирования Web of Science и/или Scopus, 11 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Следует отметить, что в шести статьях из семи опубликованных работ Александр Константинович является первым автором, что ясно проявляет существенный вклад Александра Константиновича в проведенные исследования.

Считаю, что представленная Александром Константиновичем Куцем диссертационная работа «Влияние неоднозначности визуальной информации на процессы ее обработки в нейронной сети головного мозга» полностью 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, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.5.2 – Биофизика и 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Центра
нейроэкономики и когнитивных исследований
Института когнитивных нейронаук ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»
Захаров Д.Г.

Подпись заверяю
Специалист по персоналу
Жилинская В.А.



Д.Г. Захаров

«30» ноября 2023 г.

Адрес места работы: НИУ ВШЭ, 101000, г. Москва, Кривоколенный пер., 3;

тел.: +7(495) 531 00 00 доб. 22-370

e-mail: dgzakharov@hse.ru

Научная специальность кандидатской диссертации Захарова Дениса Геннадьевича –
01.04.03 – Радиофизика.