

УДК 53.047-57.03

ДИНАМИКА ВОЛНОВЫХ РИТМОВ ГОЛОВНОГО МОЗГА ПРЕДСКАЗЫВАЕТ СКОРОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ КОГНИТИВНЫХ ЗАДАЧ

© 2024 г. Н. А. Брусинский^{1,*}, А. А. Бадарин¹, А. В. Андреев¹,
В. М. Антипов¹, С. А. Куркин¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта”, Балтийский центр нейротехнологий
и искусственного интеллекта, Калининград, Россия с

*E-mail: nikita@brusinskii.ru

Поступила в редакцию 29.08.2023 г.

После доработки 15.09.2023 г.

Принята к публикации 29.09.2023 г.

Изучены физиологические и поведенческие характеристики детей в возрасте 9–10 лет во время нейрофизиологического эксперимента, направленного на выполнение заданий, базирующихся на парадигме Штернберга. Был проведен статистический анализ стабильности волновых ритмов, а также корреляционный анализ между ними и средним временем реакции, на основе которых было показано, что индекс стабильности ритмов головного мозга может выступать в качестве биомаркера эффективности выполнения задания на рабочую память.

DOI: 10.31857/S0367676524010276, EDN: RYSSHH

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос изучения принципов и физических закономерностей работы головного мозга представляет высокий интерес для современной науки. Одним из наиболее популярных и доступных методов анализа активности головного мозга является электроэнцефалограмма (ЭЭГ) [1, 2]. Этот метод позволяет измерить электрическую активность мозга и открывает уникальные возможности для оценки и анализа когнитивных процессов.

При анализе сигналов ЭЭГ обычно выделяют периодические колебания в различных частотных диапазонах, которые называют волновыми ритмами. Эти волновые ритмы представляют собой особые паттерны электрической активности и являются проявлением коллективной динамики работы нейронов головного мозга. Известно, что изменения в амплитуде и частоте волновых ритмов могут отражать различные состояния мозга. В частности, в недавней работе [3] выявили связь между энергией в тета-диапазоне в лобной и центральной областях мозга и успешностью выполнения экспериментального задания.

Изменения энергии в различных волновых ритмах часто применяются в качестве биомаркера при разработке различных интерфейсов мозг-компьютер [4, 5]. Эти изменения энергии используются для анализа и извлечения информации о состоянии и активности мозга.

Настоящая работа является продолжением работы [6] и направлена на изучение предложенного биомаркера в рамках задачи на рабочую память.

МЕТОДЫ

Был проведен нейрофизиологический эксперимент на тестирование элементарных когнитивных функций и способность их одновременного использования в задаче. Для проведения исследования была собрана группа из 24 детей в возрасте 9–10 лет без проблем со здоровьем. Добровольцы и их родители были заранее ознакомлены с процедурой проведения эксперимента и имели возможность задать интересующие вопросы и получить на них ответы. Эксперимент состоял из трех частей, разделенных пятиминутными перерывами.

Каждая часть эксперимента содержала блок заданий на рабочую память, базирующихся на парадигме Штернберга [7], с длительностью каждого задания примерно 10–12 с. Испытуемому показывали набор из 7 элементов, расположенных в 2 ряда, 2 или 3 из которых являлись двузначными числами, которые нужно запомнить, а остальные – символом “*”. Далее шла пауза продолжительностью около 3 секунд, после которой демонстрировалось целевое число, и было необходимо ответить, было ли данное число среди показанных ранее.

В данной работе исследовался биомаркер, основанный на взаимосвязи стабильности волновых ритмов и среднего времени ответа. Существует 3 основных подхода, на основе которых происходит разбиение на временные интервалы. Один из них – разбиение на заранее определенное количество частей. Другой – разбиение на временные интервалы заранее заданной длительности. И третий заключается в привязке к триалам, когда каждой из частей соответствует одно выполнение задания. В данной работе был использован первый подход, поскольку он наиболее эффективен согласно предыдущим исследованиям [6].

Была записана 64-канальная ЭЭГ с помощью электродов, размещенных по международной схеме 10–10. Частота дискретизации сигналов ЭЭГ при записи составляла 500 Гц. Сигналы фильтровались режекторным фильтром 50 Гц для исключения шума от электросетей. Регистрация сигналов производилась с помощью электроэнцефалографа LiveAmp 64.

Расчет стабильности ритмов производился следующим образом. Сначала каждый из трех блоков заданий делился на 10 равных (с точностью до 2 мс) временных интервалов. К этим интервалам с обеих сторон было добавлено по 2 секунды для компенсации в дальнейшем влияния области краевых явлений.

После этого была рассчитана вейвлетная поверхность на основе формул, указанных в [6].

Вейвлетное преобразование проводилось отдельно в 4 частотных диапазонах: 1–4 Гц (дельта), 4–8 Гц (тета), 8–14 Гц (альфа), 14–30 Гц (бета).

После этого полученные поверхности усреднялись по времени и частоте, однако во избежание краевых эффектов с обоих концов временных рядов было исключено по 1000 точек (2 секунды),

которые были заранее дополнительно добавлены на предыдущем этапе.

Из частотно-временного вейвлетного спектра были рассчитаны усредненные по частоте энергии в стандартных диапазонах. Для расчета их дисперсии использовался следующий подход: каждый блок заданий был разделен на 10 равных по времени частей, после чего для каждого из ритмов по отдельности рассчитывались дисперсии между этими 10 величинами.

Полученные значения были затем скоррелированы со значениями среднего времени ответа. Анализ корреляций внутри первого блока заданий для изучения связи между людьми был проведен с помощью корреляций Спирмена. Для изучения же динамики эксперимента и поиска взаимосвязей между блоками был использован метод повторных корреляций. Данные на каждом канале электроэнцефалограммы тестировались отдельно друг от друга.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Поскольку полученные значения отличались на порядки, что было обусловлено формулами расчета величин и их происхождением, а также для уменьшения вариабельности между людьми к экспериментальным данным была применена процедура z-score [8]. Далее к полученным результатам был применен дисперсионный анализ повторных измерений (RM-ANOVA) [9]. Он показал статистически значимые различия между каналами для всех частотных диапазонов, а также между блоками для альфа, бета и тета диапазонов (таблица 1).

Далее был проведен анализ повторных корреляций времени отклика с дисперсией каналов. И корреляции были обнаружены во всех диапазонах, кроме альфа (таблица 2).

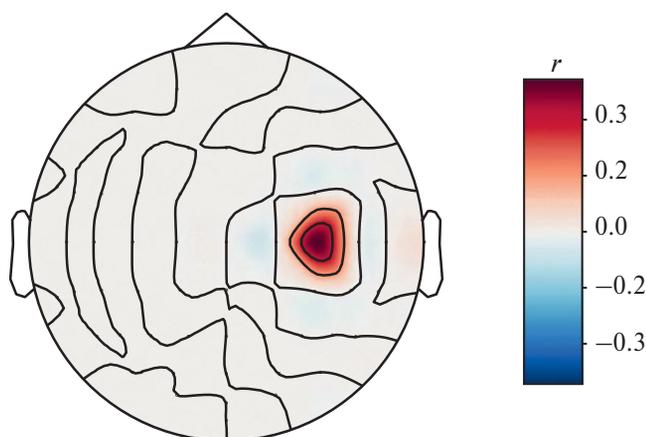


Рис. 1. Топографическая карта корреляций между стабильностью альфа-ритмов и средним временем отклика.

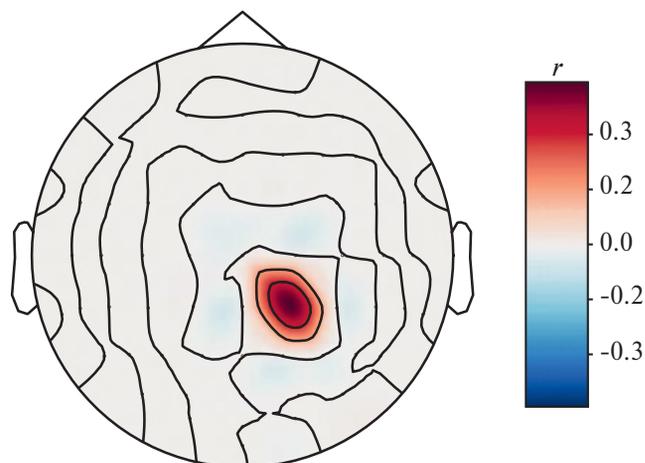


Рис. 2. Топографическая карта корреляций между стабильностью дельта-ритмов и средним временем отклика.

Таблица 1. P-value теста RM-ANOVA дисперсии волновых ритмов во время выполнения задания на рабочую память.

	block	channels	block: channels
alpha	0.00	0.00	0.29
beta	0.01	0.00	0.90
delta	0.15	0.01	0.80
theta	0.02	0.00	0.17

Таблица 2. Повторные корреляции RT с дисперсией в различных каналах

	Каналы, r
alpha	Не обнаружено
beta	FT7, $r = -0.41$ FT8, $r = -0.40$
delta	Oz, $r = 0.50$ F8, $r = 0.50$ POz, $r = 0.49$ TP10, $r = 0.40$ FT8, $r = -0.46$
theta	Fz, $r = -0.47$ TP9, $r = -0.42$ F4, $r = -0.41$ AF3, $r = -0.43$ AFz, $r = -0.43$ F1, $r = -0.41$ AF4, $r = -0.41$ F2, $r = -0.40$

Также для первого блока заданий был проведен анализ корреляций Спирмена между дисперсией каналов и средним временем отклика. Было обнаружено, что в случае альфа-частот корреляция есть лишь в канале С4, а в случае дельта-частот — в канале СР2 (рис. 1 и 2). Для двух других частотных диапазонов корреляций обнаружено не было. Это может позволить предугадывать среднее время отклика на основе стабильности вышеуказанных ритмов в соответствующих каналах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате данного исследования было обнаружено, что при выполнении задания на рабочую память стабильность активности головного мозга в определенных частотных диапазонах коррелирует со средним временем отклика, представляя собой биомаркер, который потенциально может позволять заранее предугадывать спад уровня когнитивных способностей на основе динамики волновых ритмов. Также была изучена динамика в ходе эксперимента, в результате чего было показано, что данный маркер можно использовать в режиме реального времени. Помимо этого, будучи продолжением работы [6], но при этом в эксперименте, связанном с рабочей памятью, а не внимательностью, данная работа показывает универсальность данного биомаркера для различных видов когнитивных задач.

Работа выполнена при поддержке программы “Приоритет-2030”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aragwal R., Andujar M., Canavan S.* // Pattern Recogn. Lett. 2022. V. 162. P. 71.
2. *Pappalettera C., Miraglia F., Cotelli M. et al.* // GeroSci. 2022. V. 44. No. 3. P. 1599.
3. *Badarin A., Antipov V., Grubov V. et al.* // Sensors. 2023. V.23. No. 6. P. 3160.
4. *Grubov V., Badarin A., Schukovsky N. et al.* // Cybernet. Phys. 2019. V. 8. No. 4. P. 251.
5. *Hramov A.E., Maksimenko V.A., Pisarchik A.N.* // Phys. Rep. 2021. V. 918. P. 1.
6. *Смирнов Н.М., Бадарин А.А., Куркин С.А., Храмов А.Е.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 1. С. 129; *Smirnov N.M., Badarin A.A., Kurkin S.A., Hramov A.E.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 1. P. 108.
7. *Klabes J., Babilon S., Zandi B. et al.* // Vision. 2021. V. 5. P. 21.
8. *Бослаф С.* Статистика для всех. М.: ДМК Пресс, 2015. 586 с.
9. *Гланц С.* Медико-биологическая статистика. М.: Практика, 1998. 459 с.

Dynamics of brain wave rhythms predicts the speed of cognitive tasks**N. A. Brusinsky^{a, *}, A. A. Badarin^a, A. V. Andreev^a, V. M. Antipov^a, S. A. Kurkin^a***^a Immanuel Kant Baltic Federal University, Center for Neurotechnology and Artificial Intelligence,
Kaliningrad, 236041 Russia***e-mail: nikita@brusinskii.ru*

We investigated the physiological and behavioral characteristics of children aged 9–10 years during a neurophysiological experiment aimed at performing tasks based on the Sternberg paradigm. A statistical analysis of the stability of wave rhythms as well as a correlation analysis between them and the average reaction time was carried out, based on which a biomarker of the efficiency of the working memory task was found.