

Влияние тренировки на построение вызванных потенциалов

А. О. Сельский^{1,2,*}, М. Ю. Новиков¹, К. С. Саматова¹, М. О. Журавлев^{1,2,†}

*Саратовский государственный медицинский университет имени В.И.Разумовского, НИИ кардиологии
Россия, 410012, Саратов, Большая Казачья, д. 112*

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского,
институт физики, кафедра физики открытых систем
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, д. 83*

(Поступила в редакцию 06.10.2022; подписана в печать 14.10.2022)

В настоящей работе проводится исследование вызванных потенциалов по ЭЭГ головного мозга человека для сравнения людей после тренировки и при первом выполнении теста. Тест представлял собой демонстрацию испытуемому неоднозначного объекта, в данном случае куба Неккера с разной интенсивностью сторон. Испытуемый должен был оценить ориентацию куба и нажать соответствующую кнопку: левую или правую. Целью настоящей работы является определить, как изменяются вызванные потенциалы при тренировке людей к данному тесту. Группа испытуемых насчитывала 21 человека разного возраста и пола. 11 из них уже ранее проходили тест со схожим дизайном. Остальные 10 человек столкнулись с подобным тестом впервые. Для всех испытуемых были построены вызванные потенциалы для всех каналов ЭЭГ и показаны отличия между данными группами.

PACS: 87.19.le, 87.85.dd.

УДК: 537.86, 577.345

Ключевые слова: ЭЭГ данные, когнитивные вызванные потенциалы, тренировка и обучение.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе исследуется как наличие знакомства с некоторым когнитивным тестом влияет на построение вызванных потенциалов. Данная задача крайне важна при настройке и дальнейшей работе с интерфейсами мозг-компьютер, на данный момент являющихся одним из наиболее перспективных направлений наук о человеческом мозге [1, 2]. При использовании вызванных потенциалов для работы интерфейса сначала проходят этап тренировки и настройки интерфейса, однако, если в процессе тренировки характеристики вызванного потенциала изменятся это может привести к нарушению работы интерфейса и повышению числа ошибок.

Вызванные потенциалы часто применяются для анализа ЭЭГ данных экспериментов, в ходе которых испытуемый выполняет повторяющиеся задачи, требующие внимания или когнитивной деятельности [3–8]. Когнитивные вызванные потенциалы, как известно, отличаются наличием хорошо выраженного компонента P(300) [9, 10]. Данный компонент присутствует в вызванных потенциалах при решении когнитивных задач и устойчиво наблюдается в довольно узком интервале времени после предъявления стимула.

Для исследования влияния тренировки при выполнении нейрофизиологического эксперимента как стимул было выбрано неоднозначное изображение — куб Неккера. Это хорошо известная оптическая иллюзия — куб с пересечением внутренних граней, который можно видеть в двух вариантах ориентации: левой и пра-

вой. Объект хорошо изучен и часто применялся для различных исследований с использованием электроэнцефалографии [11, 12]. В ходе эксперимента испытуемым демонстрируют кубы с разной интенсивностью внутренних граней, они пытаются определить ориентацию куба. Таким образом, мы получаем когнитивный вызванный потенциал с визуальным стимулом. И хотя куб Неккера не очень удобен для создания интерфейсов мозг-компьютер, он хорошо подходил для текущей задачи, так как ранее часть сотрудников в течение последних месяцев проходила различные нейрофизиологические эксперименты с распознаванием куба Неккера, что позволяло не проводить тренировочных записей отдельно, а просто считать сотрудников, ранее имевших дело с задачей распознавания куба Неккера, тренированными. Помимо того, была набрана группа испытуемых ранее с кубом Неккера не сталкивавшихся.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДОВ

В настоящей работе планировалось изучать как изменяется когнитивный вызванный потенциал на визуальный стимул при тренировке. Когнитивный тест представлял из себя визуальный стимул, показанный на экране монитора. Это было изображение куба Неккера — известной иллюзии с двумя пространственными ориентациями. Куб демонстрировался с разной интенсивностью внутренних граней, что подталкивает испытуемого к одной или другой ориентации. Задачей испытуемого было определить ориентацию последовательно показываемых кубов и нажать соответствующую кнопку на пульте. Время предъявления визуальных стимулов фиксировалось. В качестве испытуемых выступил 21 человек, 11 из которых ранее

* selskii@yandex.ru

† zhuravlevmo@gmail.com

проходили нейрофизиологические тесты на распознавание кубов Неккера с немного отличными дизайнами. Группа испытуемых включала людей обоих полов в возрасте от 21 до 48 лет.

Данные ЭЭГ в ходе эксперимента регистрировались на базе электроэнцефалографа (МТД «Медиком», Российская Федерация), 21 активный ЭЭГ-канал с временным разрешением 250 Гц по стандартной схеме «10–20» [13]. Все экспериментальные работы проводятся в затемненном помещении без доступа яркого света, для улучшения затемнения используются жалюзи. Испытуемый располагается в удобном кресле с возможностью индивидуальной настройки. Эксперимент длился около 35 минут для каждого испытуемого. За это время испытуемому предъявлялось около 350–400 стимулов, что вполне достаточно для построения вызванного потенциала. Регистрация ЭЭГ включала в себя состояние спокойного бодрствования с закрытыми глазами в начале и конце эксперимента, а также прохождение когнитивного теста, описанного выше, с паузами для отдыха. Продолжительность этапов записи спокойного бодрствования составляла по 5 минут каждая. В автоматической среде эксперимента были автоматически созданы протоколы с моментами предъявления каждого стимула, которые в дальнейшем использовались для построения вызванных потенциалов.

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с этическими стандартами [14] и одобрены локальным комитетом по этике исследований Саратовского государственного университета.

Вызванные потенциалы давно зарекомендовали себя в задачах анализа данных ЭЭГ при оценке реакции испытуемого на внешние стимулы, зрительные или слуховые [5]. Этот метод анализа хорошо подходит в случае предъявления множества одинаковых или похожих стимулов [3, 4]. После завершения эксперимента можно провести усреднение по отрезкам временных рядов после предъявления стимула. Важным в данном случае является точное определение времени предъявления стимулов. Если для данного канала стимул вызывает схожую реакцию при всех предъявлениях стимула, то после усреднения амплитуда сигнала увеличивается, в то время как случайная составляющая сигнала при усреднении стремится к нулю. Таким образом, вызванные потенциалы удобны для выделения особенностей ЭЭГ при определенных видах стимуляции, например, как в проведенном эксперименте.

Важно отметить, что разные стимулы вызывают разные вызванные потенциалы. Отличия вызванных потенциалов заключается в различном расположении во времени компонент потенциала (его экстремумов). Так, когнитивные вызванные потенциалы характеризуются компонентом P(300) — т.е. явно выделенным максимумом P3 — который, как правило, лежит вблизи временной отметки 310–315 мс. Такое положение компонента P(300) является общим (в рамках большой статистики) для всех людей. Однако, возможны и некоторые

индивидуальные особенности (часто на фоне нарушения когнитивной деятельности), приводящие к смещению временных интервалов, на которых наблюдаются компоненты, называемых также латентностями компонентов вызванного потенциала. На рисунке 1 приведены вызванные потенциалы, посчитанные для пары испытуемых по данным ЭЭГ канала Fz.

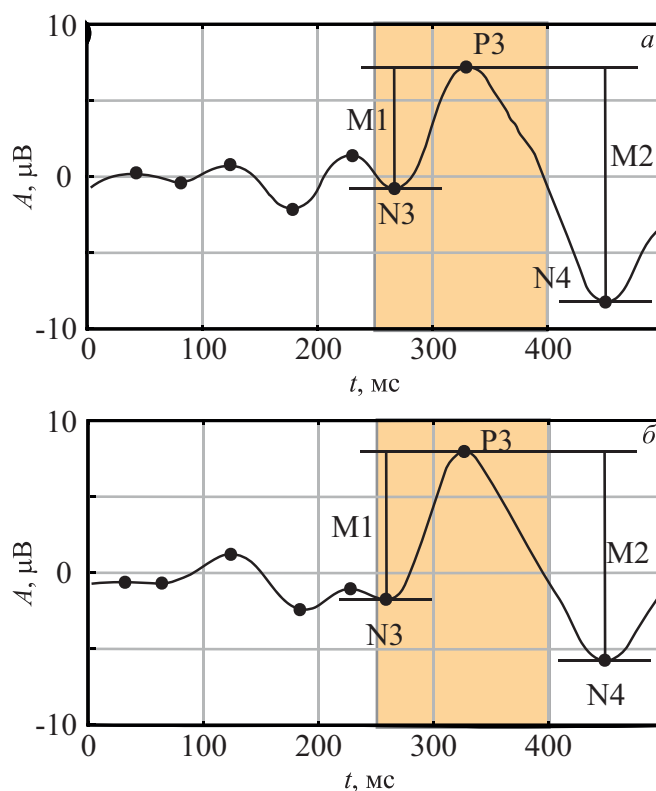


Рис. 1. Примеры вызванных потенциалов с нанесением экстремумов и компонентами вызванного потенциала, выделенными автоматически

Когнитивные вызванные потенциалы часто наиболее хорошо выделяются вдоль центральной оси головного мозга, а не в полушариях [14]. Цветной областью на рис. 1 нанесены интервалы времени, в которых обычно наблюдается компонент P300, или просто P3. Так как число испытуемых и каналов ЭЭГ может быть велико, как правило, используется автоматическая разметка вызванных потенциалов с выделением вызванных компонент. На рисунке показан результат такого автоматического выделения компонента P3 и соседних компонентом N3 и N4. Для выделения основного компонента P3 в выделенной цветом области находится наибольший максимум. По упрощенной схеме компоненты N3 и N4 находятся просто как соседние с выделенным компонентом P3 минимумы.

Если ввести показатель, показывающий насколько хорошо выделяется когнитивный вызванный потенциал, он должен учитывать разницу между компонентом P3 и соседними компонентами N3 и N4. В случае если один или несколько из этих компонентов не были вы-

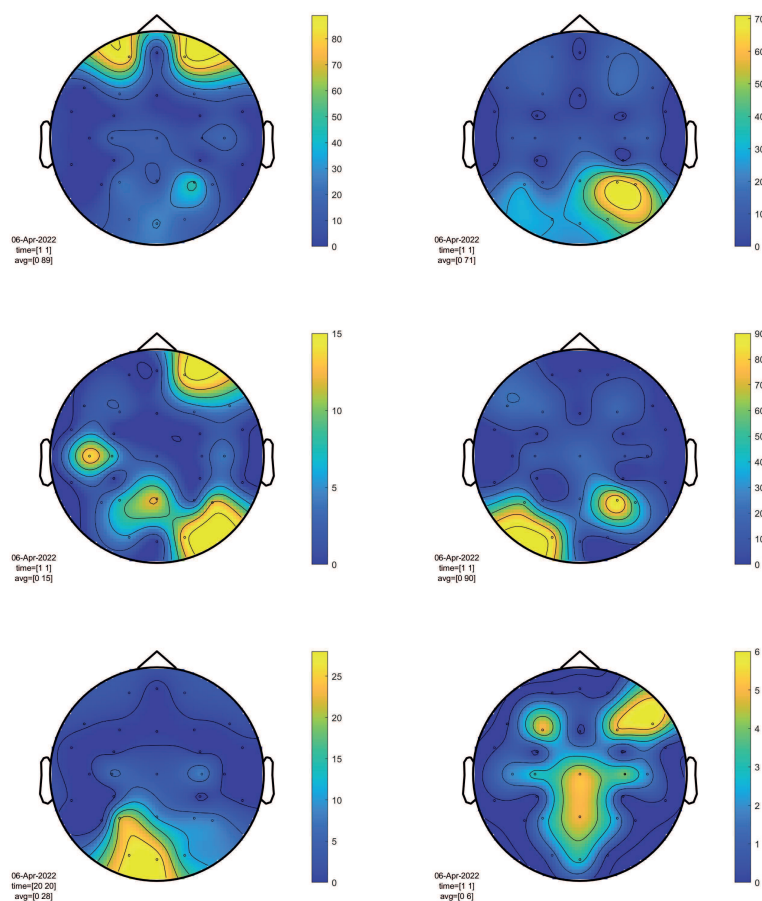


Рис. 2. Распределение величины M по каналам, нанесенное на карту головного мозга, для трех испытуемых, впервые проходивших тест (слева), и трех испытуемых, ранее проходивших похожее тестирование (справа)

делены, вместо показателя берется значение 0. Такой коэффициент будет показывать, насколько явно присутствует когнитивный вызванный потенциал при решении данного теста в том или ином канале. На рис. 1 показаны выделенные разницы амплитуд $M1$ и $M2$, рассчитав их сумму мы получим искомый коэффициент M , показывающий насколько хорошо выделяется когнитивный вызванный потенциал. Можно построить распределение величины M по каналам для данного испытуемого, найдя области, где когнитивный вызванный потенциал наиболее сильно проявляется в записи данных ЭЭГ. Примеры такого распределения по каналам показаны на рис. 2.

На этом рисунке приведены распределения по каналам для шести испытуемых, справа три для испытуемого ранее проходивших эксперименты со схожим дизайном (тренированный), три левые для двух испытуемых, впервые столкнувшихся с задачей определения ориентации куба Неккера. Данные испытуемые выбраны так чтобы продемонстрировать наиболее ярко отличия между тренированными и нетренированными испытуемыми. Можно заметить, что для двух испы-

туемых из трех, ранее проходивших схожий эксперимент, каналы с наиболее хорошо выделенными когнитивными потенциалами (с наибольшим значением коэффициента M) располагаются ближе к затылку. Данная тенденция очень сильна, из 11 испытуемых, ранее проходивших эксперимент со схожим дизайном, только у одного человека она сменяется на ровное распределение каналов с хорошо выделенными вызванными потенциалами по всей голове, он также показан на рис. 2 снизу справа.

Для испытуемых без опыта в распознавании ориентации изображения распределение каналов с наибольшим параметром M не имеет столь строгой тенденции. У двоих распределение схоже с тренированными участниками эксперимента и каналы с наибольшими значениями параметра M расположены ближе к затылку (как на рисунке 2 слева снизу). Для 4 испытуемых наблюдается распределение каналов с большими M вблизи лба, как на рис. 2 слева сверху. И еще для 4 каналы с большими значениями параметра M распределены примерно равномерно по голове испытуемого, как на рис. 2 слева по середине.

У данного эффекта есть интуитивное объяснение. При тренировке к распознаванию ориентации задача становится более автоматически решаемой и вызванные потенциалы наблюдаются в основном в отделе, отвечающем за обработку зрительных образов — затылке. В случае если задача новая, помимо зрительной обработки необходимо осмысленное решение, за что отвечают фронтальные зоны коры головного мозга. Таким образом, мы можем на основе этих рисунков выдвинуть некоторую гипотезу — при тренировке с визуальным стимулом каналы, в которых наблюдается наиболее явные компоненты когнитивных вызванных потенциалов, смещаются от области лба к затылку.

2. ВЛИЯНИЕ ТРЕНИРОВКИ НА ПОСТРОЕНИЕ ВЫЗВАННОГО ПОТЕНЦИАЛА

Для проверки высказанной гипотезы метод графического представления подходит не очень хорошо. Поэтому было предложено рассчитать отдельно сумму коэффициентов M , лежащих в области лба и отдельно сумму коэффициентов в затылочной области, а далее работать с их отношением. Если отношение сумм коэффициентов M будет больше 1 — значит большая часть каналов с хорошо выделенными вызванными потенциалами лежит ближе к области лба. Если меньше 1 — значит чаще хорошие выделенные потенциалы наблюдаются в затылочной части головы. Если отношение сумм коэффициентов M примерно равно одному, то каналы с наибольшей разницей амплитуд между компонентами $P3$ и $N3$, $P3$ и $N4$ почти равномерно распределены по голове испытуемого. Изначально испытуемые были поделены на 2 группы: 11 человек, ранее проходивших эксперименты с распознаванием ориентации куба Неккера, и 10 человек, ранее не участвовавших в экспериментах с подобным дизайном. Дальнейшей задачей является изучение отличий в отношении сумм коэффициентов M , лежащих в области лба и в затылочной области, для этих двух групп. Для удобства данные по эксперименту сведены в таблицу.

В таблице зеленым цветом показаны случаи, когда гипотеза, высказанная в предыдущем разделе, подтверждается, красным случаи, когда опровергается. Черным цветом показаны 3 случая, когда соотношение сумм коэффициентов каналов, расположенных в передней части головы, к каналам, расположенным в затылке близко к единице. Хорошо заметно, что для испытуемых, ранее проходивших подобный тест, случаев когда отношение становится больше 1 почти нет.

То, что чаще всего коэффициенты, опровергающие основную гипотезу, встречаются у испытуемых, ранее тест не проходивших, может объясняться тем, что часть испытуемых очень быстро тренировалась распознавать ориентацию куба Неккера и отношение для них изначально выглядит похожим на испытуемых, ранее проходивших тест.

При этом, какой-либо зависимости для суммарно-

го по всем каналам коэффициента M не наблюдается. Для проверки этих утверждений были построены диаграммы размаха для суммарного коэффициента M и для отношения сумм коэффициентов каналов, расположенных в передней части головы, к каналам, расположенным в затылке, для обеих групп испытуемых, рис. 3.

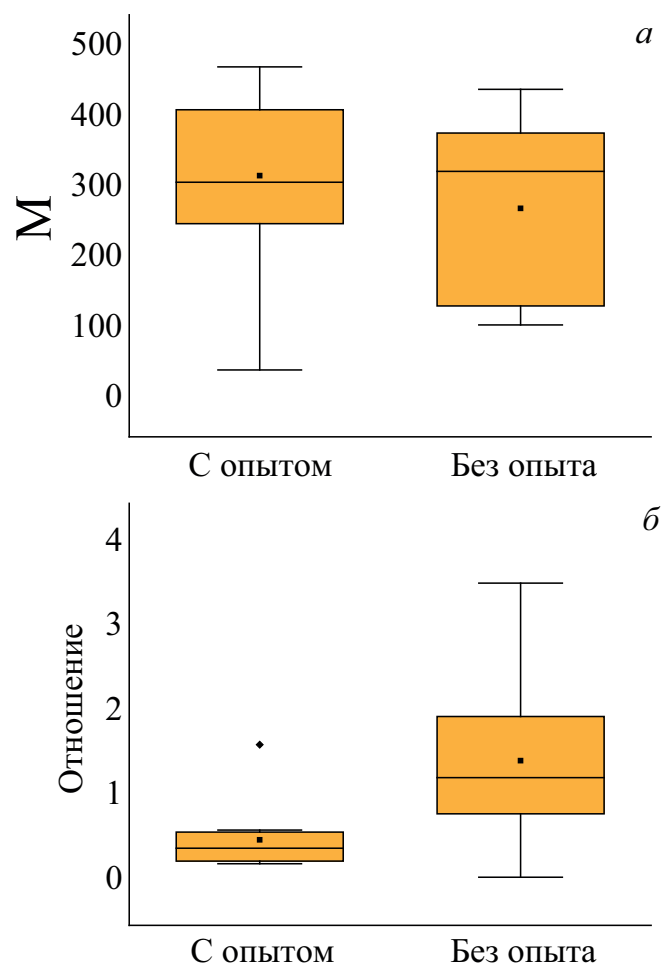


Рис. 3. Диаграммы размаха для испытуемых с опытом прохождения подобных тестов и без опыта для суммы параметра M (а) и для отношения сумм коэффициентов каналов, расположенных в передней части головы, к каналам, расположенным в затылке (б)

Из диаграмм хорошо видно, что статистической разницы между группами по суммарному коэффициенту почти нет, тогда как для отношения статистически эти группы хорошо разделены. Это позволяет несколько изменить первоначальную гипотезу: при использовании визуальных стимулов когнитивные вызванные потенциалы наиболее хорошо выделяются в области затылка, если испытуемый ранее проходил эксперимент со схожим дизайном, тогда как при первом прохождении эксперимента распределение может быть довольно широким.

Таблица. Суммарный коэффициент соответствия среднему вызванному потенциалу; отношение сумм коэффициентов каналов, расположенных в передней части головы, к каналам, расположенным в затылке; опыт участия в экспериментах с бистабильными изображениями разного дизайна

N	ΣM	Отношение ΣM по лбу к ΣM по затылку	Опыты прохождения похожего теста
1	136	0.07079646	Нет
2	409	0.26755853	Есть
3	414	0.41397849	Есть
4	382	2.32768362	Нет
5	109	0.63030303	Нет
6	312	0.62835249	Есть
7	415	0.23021583	Есть
8	325	0.94650206	Нет
9	413	0.82191781	Нет
10	444	1.97435897	Нет
11	147	1.52083333	Нет
12	349	0.97959184	Нет
13	253	0.50839329	Есть
14	305	0.39534884	Есть
15	420	0.26068376	Есть
16	330	1.68660969	Нет
17	305	0.25908373	Есть
18	113	3.55555556	Нет
19	181	0.43055556	Есть
20	45	1.64102564	Есть
21	476	0.60561661	Есть

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье изучалось влияние тренировки на вызванные потенциалы, построенные по данным ЭЭГ. Под тренировкой подразумевается опыт прохождения когнитивного теста со схожим дизайном. В качестве теста использовались визуальные стимулы — куб Неккера. В ходе прохождения теста испытуемый наблюдал большое число кубов с разной ориентацией внутренних граней и определять их ориентацию. Показано, что при повторном прохождении теста со схожим дизайном наблюдается статистически достоверное изменение в наблюдаемых вызванных потенциалах. Наиболее хорошо выделенные вызванные потенциалы для данной группы испытуемых наблюдались вблизи затылочной части головы, тогда как у испытуемых впервые проходивших подобный тест распределение по каналам может быть довольно произволь-

ным. Данный результат можно объяснить тем, что при повторном прохождении теста с визуальными стимулами больше информации обрабатывается в зрительном центре в затылке. Большой разброс результатов у людей, впервые проходивших тест может объясняться разной скоростью тренировки и обучения. Данный результат важен для учета при использовании зрительных вызванных потенциалов в интерфейсах мозг-компьютер, так как показывают необходимость двойной настройки интерфейса.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Минздрава России #056-00030-21-01 от 05.02.2021 г. «Теоретическое и экспериментальное исследование интегративной активности различных физиологических систем человека при стрессовых воздействиях» (номер государственного учёта НИОКТР 121030900357-3).

[1] Emge D.K., Vialatte F.B., Dreyfus G., Adali T. // Brain Topogr. 2018. **31**, N 1. P. 117.

[2] Kato K., Takahashi K., Mizuguchi N., Ushiba J. // J Neurosci Methods. 2018. **293**. P. 289.

- [3] Cooper N.R., Burgess A.P., Croft R.J., Gruzelić J.H. // *NeuroReport*. 2006. **17**. P. 205.
- [4] Hillyard S.A., Hinrichs H., Tempelmann C. et al. // *Hum. Brain Mapp.* 1997. **5**. P. 287.
- [5] Makeig S., Westerfield M., Jung T.P. et al. // *Hum. Brain Mapp.* 2002. **295**. P. 690.
- [6] Mast J., Victor J.D. // *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 1993. **78**. P. 389.
- [7] Schack B., Klimesch W. // *Neurosci. Lett.* 2002. **331**. P. 107.
- [8] Parra L., Spence C., Gerson A., Sajda P. // *IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2003. **11**, N 2. P. 173.
- [9] Huang M.-W., Chou F. H.-C., Lo P.-Y., Cheng K.-S. // *BMC Psychiatry*. 2011. **11**. P. 74.
- [10] Levichkina E.V., Kaplan A.Ya. // *Human Physiology*. 2009. **35**, N 2. P. 74.
- [11] Elbert T., Hommel J., Lutzenberger W. // *Int. J. Psychophysiol.* 1985. **3**, N 1. P. 5.
- [12] Dnáz-Santos M., Cao B., Yazdanbakhsh A., Norton D.J., Neargarder S., Cronin-Golomb A. // *Neuropsychologia*. 2015. **69**. P. 183.
- [13] Jurcak V., Tsuzuki D., Dan I. // *Neuroimage*. 2007. **34**, N 4. P. 27.
- [14] World medical association (2000) declaration of helsinki: ethical principles for medical research involving human subjects. *The Journal of the American Medical Association*. 2000. **284**, N 23. P. 30433045.

Influence of training on the construction of evoked potentials

A.O. Selskii^{1,2,a}, M.Yu. Novikov², K.S. Samatova², M.O. Zhuravlev^{1,2,b}

¹Federal State Government-Financed Educational Institution of Higher Professional Education “Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky”

Saratov, 410012, Russia ²Ministry of Health and Social Development of the Russian Federation State Educational Institution of Higher Professional Education “Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky”

Saratov, 410012, Russia

E-mail: ^aselskii@yandex.ru, ^bzhuravlevmo@gmail.com

In the present work, a study of evoked potentials on the EEG of the human brain is carried out to compare people after training and at the first test. The test was a demonstration to the subject of an ambiguous object, in this case a Necker cube with different intensities of the sides. The subject had to evaluate the orientation of the cube and press the appropriate button: left or right. The purpose of this work is to determine how evoked potentials change when people are trained for this test. The group of subjects consisted of 21 people of different ages and genders. 11 of them have already passed the test with a similar design. The remaining 10 people faced such a test for the first time. For all subjects, evoked potentials were constructed for all EEG channels and the differences between these groups were shown.

PACS: 87.19.le, 87.85.dd.

Keywords: EEG data, cognitive evoked potentials, training and education.

Received 06 October 2022.

Сведения об авторах

1. Сельский Антон Олегович — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: selskii@yandex.ru.
2. Новиков Михаил Юрьевич — студент 5 курса СГМУ; тел.: (845) 239-39-78, e-mail: Mikhail.novikov.med@gmail.com.
3. Саматова Камила Саматовна — студентка 5 курса СГМУ; тел.: (845) 239-39-78, e-mail: kamilasamatova@rambler.ru.
4. Журавлев Максим Олегович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (845) 239-39-78, e-mail: zhuravlevmo@gmail.com.