

диспансеризации позволяют выделить лиц, нуждающихся в более глубоком обследовании. Визуальное отображение спектральной мощности в виде гистограмма для диапазонов очень удобно для быстрой оценки распределения спектральной мощности по диапазонам и может быть использовано при проведении массовых обследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кипятков Н.Ю., Дутов В.Б. Перспективы использования интегративных показателей компьютерной обработки ЭЭГ в структуре экспресс-анализа нейрокогнитивного статуса // Педиатр. 2014. Т. 5. № 1. С. 44-48.
2. Kipyatkov N.Yu., Dutov V.B., Timkina O.V., Lytaev S.A. Methods of mental state examination in conditions of time storage // Changing Word and Environment: Approaches in Military Psychology and Psychophysiology. 44th International Applied Military Psychology Symposium. 2008. С. 54-55.
3. Терещенко Е.П., Пономарев В.А., Мюллер А., Кропотов Ю.Д. Нормативные значения спектральных характеристик ЭЭГ здоровых испытуемых от 7 до 89 лет // Новые исследования. Москва. 2010. С. 4-10.
4. Monastra V.J., Lubar J.F., Linden M. The Development of a Quantative Electroencephalographic Scanning Process for Attention Deficit/Hyperactivity Disorder: Reliability and Validity Studies // Neurophysiology. 2001. V. 15. № 1. P. 136.
5. Балдова С.Н., Белова А.Н., Шейко Г.Е. Количественная электроэнцефалография при изучении расстройств аутистического спектра // Практическая медицина. 2017. Том 1. С. 35-39.
6. Белявский Н.Н. Динамика изменений спектра мощности ЭЭГ у больных с транзиторными ишемическими атаками в каротидном бассейне // Вестник ВГМУ. 2007. Том 6. № 2. С. 134-157.
7. Klimesch W., Doppelmayr M., Wimmer H. et al. Alpha and beta band power changes in normal and dyslexic children // Clin. Neurophysiology. 2001. V. 112(7). P. 1186.
8. Мельникова Т.С., Саркисян В.В. Характеристики электроэнцефалографии эмоциональной памяти у больных при первом эпизоде параноидной шизофрении // Российский психиатрический журнал. 2017. Том 5. С. 68-72.
9. Кипятков Н.Ю., Лытаев С.А., Дутов В.Б. Особенности ЭЭГ лиц занимающихся определенными видами профессиональной деятельности // Материалы XXIII съезда Физиологического общества им. И. П. Павлова с международным участием. 2017. С. 1268-1269.
10. Бакузова Д.В., Кожеватова Е.А. Возможности дискриминантного анализа электроэнцефалограмм в диагностике сосудистых умеренных когнитивных расстройств // Вестник неврологии, психиатрии и нейрохирургии. 2015. № 8. С. 41-45.

УДК 612.821

ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ, ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ И СОЦИАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ИСЛЕДОВАНИЙ ВОЛНЫ P₃₀₀ СЕНСОРНЫХ ВЫЗВАННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

Лытаев Сергей Александрович

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук
14-я линия, В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178, Россия
e-mail: iamps2008@mail.ru

Аннотация. В статье осуществлен обзор современных исследований известного психологического феномена P₃₀₀ вызванных потенциалов, а также приводятся результаты собственных исследований. Показано, что лица с ограниченными двигательными возможностями могут использовать системы «интерфейс мозг-компьютер» основе P₃₀₀ для общения, передвижения на коляске, управления нейропротезами. Показана роль волны P₃₀₀, а также более поздних волн N₄₅₀, N₇₅₀, N₉₀₀ в категоризации зрительных образов у здоровых людей и больных.

Ключевые слова: вызванные потенциалы; компонент P₃₀₀; интерфейс мозг-компьютер; спеллер; oddball парадигма; категоризация образов.

PHYSIOLOGICAL, PSYCHOLOGICAL AND SOCIAL ASPECTS OF RESEARCH OF THE P300 WAVE OF SENSORY EVOKED POTENTIALS

Lytaev Sergey

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Science
39 14th line, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199178, Russia
e-mail: iamps2008@mail.ru

Abstract. The article provides a review of modern research on the well-known psychological phenomenon of P₃₀₀ evoked potentials, as well as the results of their own research. It is shown that persons with mobility impairments can use the P₃₀₀-based brain-computer interface system for communication, wheelchair use, and neuro prosthesis management. The role of the P₃₀₀ wave, as well as the later waves N₄₅₀, N₇₅₀, N₉₀₀ in the categorization of visual images in healthy people and patients is shown.

Keywords: evoked potentials; component P₃₀₀; brain-computer interface; speller; oddball paradigm; categorization of images.

Первые наблюдения за волной P300 были опубликованы в середине 1960-х гг. В 1964 г. исследователи Чепмен и Брэгдон (Chapman R.M., Bragdon H.R., 1964) обнаружили, что ответы ERP на зрительные стимулы различались в зависимости от того, имели ли эти стимулы значение или нет [1].

В 1965 г. Саттон с соавт. (Sutton S. et al., 1965, 1967) опубликовали результаты экспериментов, где дополнительно исследовали позднюю позитивную волну [2, 3]. Результаты позволили сделать два важных вывода. Во-первых, поздняя позитивная волна возникала, когда была решена неопределенность в отношении типа щелчка, и во-вторых, даже отсутствие стимула выявляло поздний позитивный комплекс, если указанный

стимул имел отношение к задаче. Эти ранние исследования стимулировали использование метода регистрации потенциалов, связанных с событиями (event-related potential, ERP) для изучения сознания и послужили основой для обширных работ над P300 в последующие десятилетия.

С середины 1980-х годов одно из наиболее обсуждаемых применений компонента P300 связано с обнаружением лжи (Pritchard W.S., 1981). В предлагаемом «тесте на знание вины» субъект подвергается допросу через «причудливую» парадигму так же, как и в типичной ситуации с детектором лжи. Эта практика иногда использовалась в некоторых юридических ситуациях [4].

Для генерации волны P300 ERP в настоящее время используются три парадигмы (рис. 1): с одним стимулом, «причудливая» (странная, oddball) и с тремя стимулами. В каждом случае субъекта просят следить за достижением цели, нажав кнопку или считая мысленно с последующим отчетом. Парадигма с одним стимулом нерегулярно представляет только один тип стимулов или цель с нулевым появлением цели любого другого типа [5, 6].

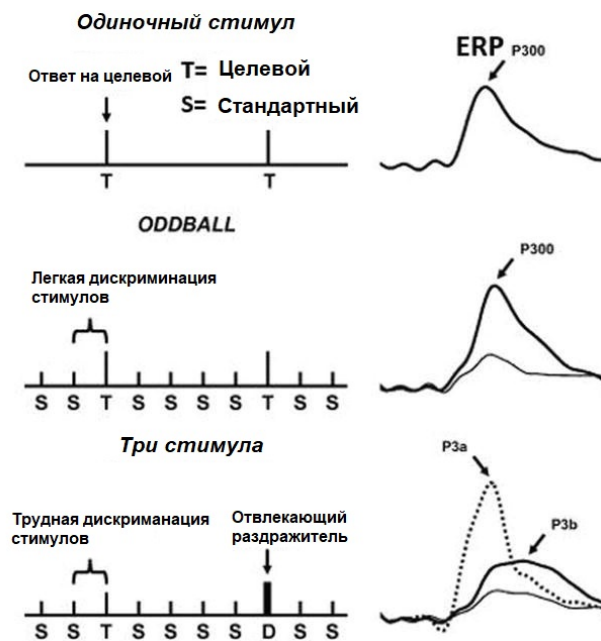


Рис. 1. Парадигмы исследования волны P₃₀₀ ERPs: с одним стимулом (вверху), oddball (середина) и тремя стимулами (внизу). Потенциал, связанный с событием представлен справа (Haider A., Fazal-Rezai R., 2017)

Системы «интерфейс мозг-компьютер» на основе P₃₀₀

В последние два десятилетия практические исследования компонента P300 ERP связаны с системами «интерфейс мозг-компьютер» (ИМК), которые помимо решения физиологических и психологических задач имеют и социальное значение. Современные системы ИМК могут использовать ряд электрофизиологических сигналов – зрительные ВП (ЗВП), медленные корковые потенциалы (МКП), альфа-, бета-ритм ЭЭГ и компонент P300 вызванных потенциалов.

В системе ИМК (рис. 2) оцифрованный биоэлектрический сигнал, зарегистрированный со скальпа, отправляется на уровень обработки, где извлекаются необходимые признаки посредством применения пространственной фильтрации и спектрального анализа [7]. Чтобы извлечь полезную информацию ИМК может использовать временные параметры сигнала (пиковую латентность ВП, компоненты P₃₀₀), частотные характеристики (ЭЭГ ритмы), пространственные параметры, а также комбинацию все перечисленных характеристик [8].

Волна P300 привлекла большое внимание в исследованиях ИМК (рис. 3) [9, 10]. Распределение P300 на поверхности скальпа имеет максимум в области центрально-теменных электродов. Поскольку P300 вызывают только oddball (странные) раздражители, которые требуют специального внимания пользователя, его можно использовать в качестве управляющих сигналов в ИМК, чтобы выбрать желаемый выбор Пользователя (испытываемые) могут воздействовать на амплитуду P300, уделяя больше внимания конкретному событию. Поэтому P300 используется во многих системах ИМК для раскрытия намерений или информации, скрытой в ЭЭГ.

Показано, что лица с ограниченными возможностями могут использовать ИМК на основе P300 для общения [11]. Предложена система орфографии (спеллер) P300, которая позволяет субъектам передавать последовательность букв на компьютер (рис. 4, слева). Для создания «странной» oddball парадигмы на экране компьютера отображается матрица 6x6, содержащая буквы алфавита и цифры. Человек может выбрать конкретный знак, сосредоточив на нем внимание. ИМК также может использоваться для управления инвалидной коляской (рис. 4, справа). С помощью P300 системы ИМК пользователь может выбрать пункт назначения в меню путем подсчета количества миганий пункта назначения. Далее инвалидная коляска перемещается к выбранному и желаемому месту назначения по заранее определенному пути.

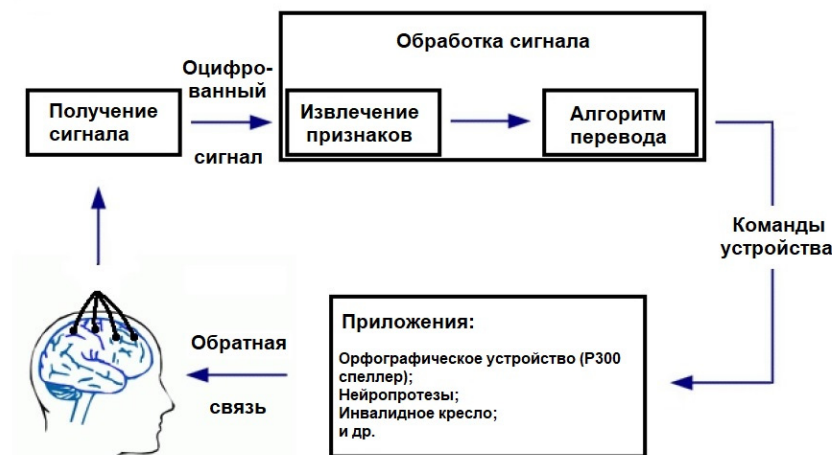
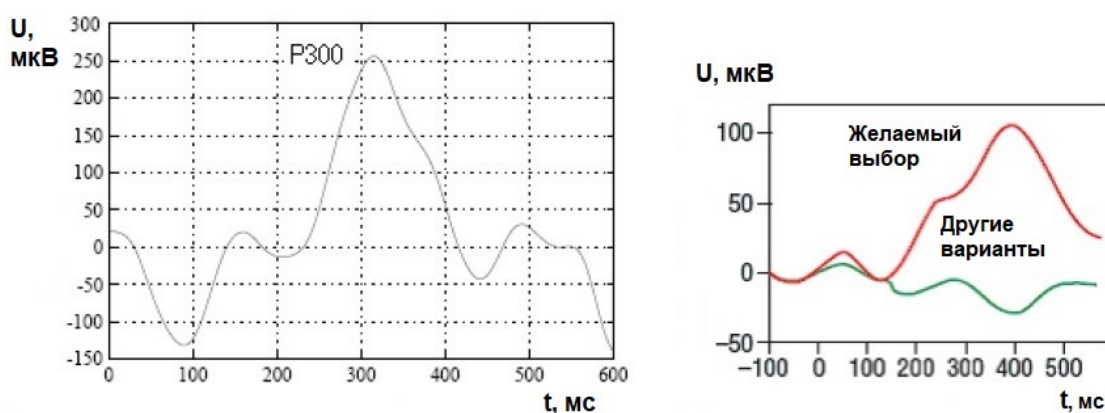


Рис. 2. Функциональная модель системы «интерфейс мозг-компьютер» (Wolpaw et al, 2002)

Рис. 3. Волна P_{300} . По оси ординат – амплитуда, мкВ, по оси абсцисс – время после подачи сигнала, мс. P_{300} – типичное положительное отклонение в ЭЭГ, приблизительно через 300 мс после представления редкого, неожиданного или желаемого стимула. (Rebsamen B. et al., 2007, Hoffmann U. et al., 2008)Рис. 4. Примеры использования ИМК на основе P_{300} . Слева – спеллер P_{300} , позволяющий пользователю передавать письма на компьютер. Справа – ИМК на основе P_{300} , позволяющий пользователю перемещаться на инвалидной коляске по квартире (Sellers et al., 2006)

Помимо инвалидной коляски важным приложением для людей с тяжелыми нарушениями моторики является управление нейропротезными устройствами. ИМК можно использовать для управления движений конечностей, например, роботизированной руки. Показано, что ИМК, основанный на активности корковых нейронов, способен контролировать трехмерные движения руки робота [12].

Системы ИМК могут поддерживать связь у парализованных пациентов, страдающих вследствие неврологических или нейромышечных заболеваний (например, боковой амиотрофический склероз (БАС)). По мере прогрессирования заболевания можно выделять различные состояния. В полностью заблокированном состоянии произвольный мышечный контроль теряется. Многие пациенты с БАС, достигшие этого состояния, имеют нарушения зрения и могут не иметь возможности использовать ИМК через зрительный анализатор. Обычно у этих пациентов слуховая система не повреждена, поэтому изучение возможности использования ИМК на основе слуховых сигналов может иметь большое значение [7].

P_{300} и другие поздние волны зрительных ВП при категоризации образов и при повреждении головного мозга

Амплитудно-временные параметры N_{70} у здоровых испытуемых (рис. 5) характеризуются стабильным проявлением только в затылочных отведениях. В остальных отделах коры головного мозга они выражены в меньшей степени, как по амплитуде, так и по функциональной устойчивости, а во фронтальных отведениях иногда вообще отсутствуют, как это прослеживается на рисунках 5 и 6А. Вместе с тем обращает внимание факт некоторого облегчения амплитуды N_{70} в центральных отделах мозга ($F > 4.0$, дискриминантный анализ) при восприятии oddball образа [13, 14].

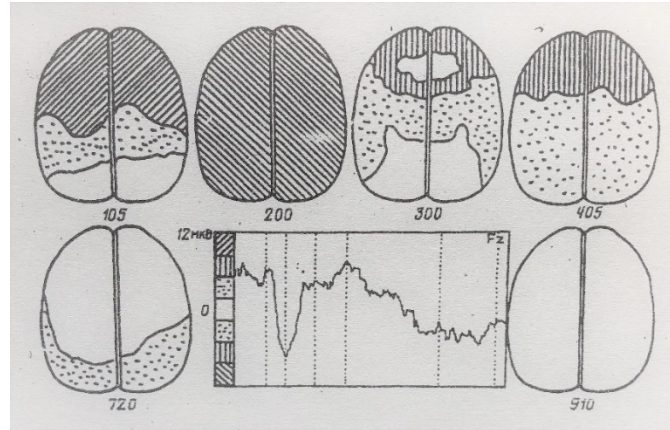


Рис. 5. Последовательные топограммы при восприятии знакомого зрительного образа. Полярность и ПЛ топокарт соответствуют компоненту, отмеченному маркером. ПЛ – время, мс. Оригинальный рис

Картирование мозга по компоненту N_{150} (рис. 6А, 130.0 мс) показывает максимальную активацию передних отделов мозга, а также некоторое запаздывание во времени и снижение амплитуды этой волны в парietальных и затылочных отведениях. Амплитудные характеристики N_{150} значимо выше в центральных отведениях ($C_4 - C_3$) при восприятии опознаваемого объекта ($F > 10.0$), причем пространственно-временные параметры в этом случае имеют стабильное проявление. В затылочных и фронтальных областях коры головного мозга амплитуда N_{150} незначительно отличается в обеих задачах ($F < 4.0$), между тем предъявление неопознаваемого образа сопровождается более устойчивыми временными показателями.

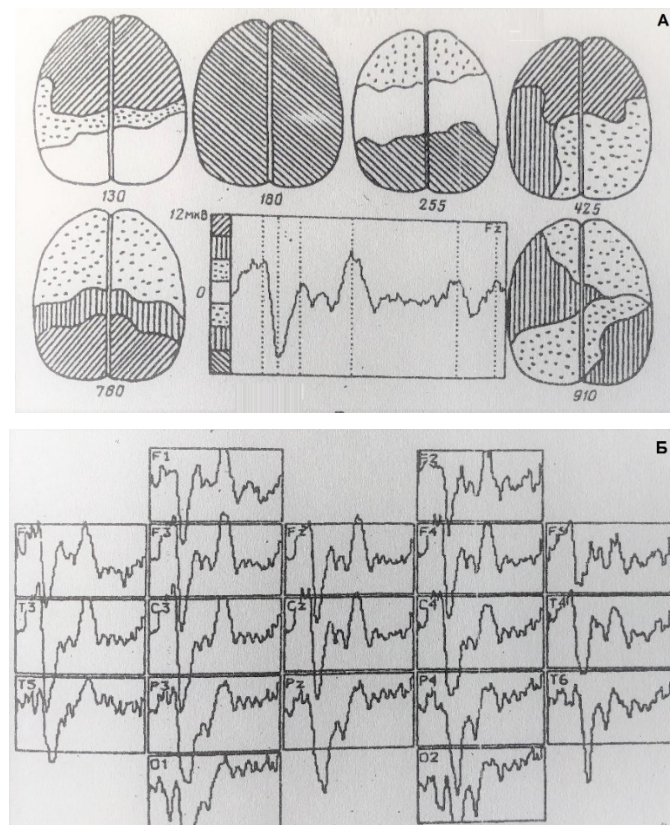


Рис. 6. Последовательные топограммы (А) и распределение ЗВП по поверхности мозга (Б) при восприятии oddball (неопознаваемого) зрительного образа. Обозначения топокарт см. рис. 5. Оригинальный рис

Наиболее значимые различия, по нашим данным, отмечаются через 250–300 мс с момента подачи стимула. Причем по степени стабильности для всех последующих составляющих ВП (N_{350} , N_{450} , N_{750} , N_{900}) отмечается высокая вариабельность пиковой латентности (низкий порядковый номер фактора) и в то же время относительная стабильность амплитудных характеристик (максимальный порядковый номер фактора).

Амплитуда сверхпоздних компонентов N_{750} и N_{900} также выше в условиях предъявления неопознаваемого образа независимо от локализации точек регистрации. Отмечается, что если при восприятии опознаваемого объекта амплитуда N_{750} и N_{900} практически не отличается друг от друга в разных отведениях или вообще приближается к изолинии, то в случае стимуляции неопознаваемым предметом амплитуда N_{750} облегчается от затылка ко лбу, а динамика N_{900} носит обратный характер (амплитуда выше в затылочных отведениях).

Заключение. Когнитивные зрительные вызванные потенциалы. Будущее P300 систем «интерфейс мозг-компьютер»

Таким образом, компоненты зрительных ВП N_{70} и N_{150} , отражающие соответственно ранние и промежуточные механизмы избирательного внимания, являются самыми ранними индикаторами информативности раздражителя. Отсутствие опознания, характеризующееся пониженной амплитудой волн N_{150} в ассоциативной коре и N_{350} по всей поверхности мозга свидетельствует, вероятно, о недостаточном по силе нейронном взаимодействии, обеспечивающим мнестические функции. В свою очередь, это сопровождается повышенной амплитудой более поздних компонентов ЗВП.

Индикатором завершения процессов категоризации в норме служит волна N_{350} . При мозговой патологии повышение амплитуды N_{350} в центральной коре свидетельствует (по аналогии с восприятием oddball зрительного образа) о более ранней (чем у здоровых) активации механизмов долговременной памяти. Актуализация кратковременной зрительной памяти сопровождается активацией поздних негативных волн на отрезке времени 400 – 500 мс в равной степени у здоровых и больных [15, 16].

Компонент N_{450} является наиболее специализированным индикатором восприятия неопознаваемых (oddball, «чудоковатых») зрительных образов. Волны более поздней негативации (600–1000 мс), вероятно, отражают дальнейшие процессы категоризации изображений, которые, протекают либо по инерции, представляя определенную цикличность и сходство с ранними и промежуточными этапами перцепции, либо активно отражают реверберацию возбуждения.

Имеются основания полагать, что при мозговой патологии успешное опознание завершается раньше, чем у здоровых испытуемых, о чем свидетельствует понижение пиковой латентности волн P_{250} и N_{350} . Отрицательное опознание, в свою очередь, в этих случаях быстрее актуализирует механизмы долговременной памяти при интеграции ассоциативной и проекционной коры.

Сверхпоздние волны (N_{750} и N_{900}) по сравнению с контрольной группой у больных находятся в обратной зависимости – восприятие опознаваемой фигуры сопровождается более выраженными амплитудами, чем восприятие неопознаваемого (oddball) образа.

Перспективные направления развития исследований систем ИМК P300 заключаются в увеличении пропускной способности информационных потоков [12]. Чтобы расширить применение P300 ERP для нескольких модальностей, необходимо тщательно изучить базовые физиологические механизмы и реакцию мозга для конкретной сенсорной системы и психической функции. Интеграция в системах ИМК состоит из целого ряда дисциплин, таких как инженерия, когнитивная и нейробиология, семантика, математика, психология, клиническая наука и создание программного продукта. Таким образом, ИМК системы позволяют пользователям связываться или управлять устройствами, используя мозговую деятельность. Моторные действия не требуются, что делает его ценным помощником при тяжелых двигательных нарушениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chapman R.M., Bragdon H.R. Evoked responses to numerical and non-numerical visual stimuli while problem solving. *Nature*. 1964. 203 (4950): 1155–1157. doi:10.1038/2031155a0.
2. Sutton S., Braren M., Zubin J., John E.R. Evoked-Potential Correlates of Stimulus Uncertainty. *Science*. 1965. 150 (3700): 1187–1188. doi:10.1126/science.150.3700.1187.
3. Sutton S., Tueting P., Zubin J., John E.R. Information delivery and the sensory evoked potential. *Science*. 1967. 155 (3768): 1436–1439. doi:10.1126/science.155.3768.1436.
4. Pritchard W.S. Psychophysiology of P300. *Psychological Bulletin*. 1981. 89(3): 506–540. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.89.3.506>
5. Haider A., Fazel-Rezai R. Application of P300 Event-Related Potential in Brain-Computer Interface, Event-Related Potentials and Evoked Potentials, Phakharawat Sittiprapaporn, IntechOpen, 2017. DOI: 10.5772/intechopen.69309
6. Лытаев С.А., Александров М.В., Березанцева М.С. Психофизиология. 3-е изд., перераб. и допол. Санкт-Петербург: СпецЛит, 2018. 256 с.
7. Wolpaw J.R., Birbaumer N., McFarland D.J., et al. Brain-computer interfaces for communication and control. *Clin. Neurophysiol.* 2002. 113 (6): 767–791. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(02\)00057-3](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(02)00057-3)
8. Donchin E., Spencer K.M., Wijesinghe R. The Mental Prosthesis: Assessing the Speed of a P300-Based Brain-Computer Interface. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*. 2000. 8 (2): 174–179. doi:10.1109/86.847808.
9. Rebsamen B., Teo C.L., Zeng Q., Ang Jr.M.H., Burdet E., Guan C., Zhang H., Laugier C. Controlling a wheelchair indoors using thought. *IEEE intelligent systems*. 2007. 18–24. <https://doi.org/10.1109/MIS.2007.26>
10. Hoffmann U., Vesin J., Ebrahimi T., Diserens K. An efficient P300-based brain-computer interface for disabled subjects. *J. Neurosci. Methods*. 2008. 167: 115–125. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2007.03.005
11. Sellers E., Donchin E. A P300-based brain-computer interface: initial tests by ALS patients. *Clin Neurophysiol.* 2006. 117(3): 538–48. doi: 10.1016/j.clinph.2005.06.027
12. Levi-Aharoni H., Shriki O., Tishby N. Surprise response as a probe for compressed memory states. *PLOS Computational Biology*. 2020. 16 (2): e1007065. doi:10.1371/journal.pcbi.1007065.