

Исследование восприятия куба Неккера по многоканальным данным ЭЭГ человека: оценка и динамика низкочастотных компонент с учётом пространственного распределения

А.Е. Руннова^{1,2}, В.В. Грубов¹, М.О. Журавлев^{1,2}, М.К. Куровская²
¹*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.*
²*Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского*
anefila@gmail.com

Сегодня нейрокогнитивные исследования, включающие в себя постановку психологических экспериментов и измерение объективных показателей деятельности нервной системы человека, являются популярным инструментом исследования головного мозга и когнитивных функций человека. Настоящее исследование посвящено изучению зарегистрированных сигналов электрической активности коры и подкорковых центров головного мозга человека при восприятии сложных визуальных образов, допускающих неоднозначное восприятие. Для записей электрической активности было использовано электроэнцефалографическое оборудование «Энцефалан-ЭЭГР-19/26» (Медиком МТД), позволяющее регистрировать многоканальные ЭЭГ с высоким временным разрешением в течение продолжительного времени. Для записей ЭЭГ был использован монополярный метод регистрации и стандартная международная система размещения электродов «10–20».

Основной объект в представляемой работе экспериментальной работе – это неоднозначно воспринимаемое изображение или, так называемое, двойственное или реверсивное изображение, для которого допускаются различные соотношения «фигуры» и «фона» в зависимости от наблюдателя. Классической фигурой с обратимой перспективой является куб Неккера названный так в честь швейцарского математика и физика Луиса Альберта Неккера (1730-1804), который сообщил о том, что кристаллы и их рисунки во время научных наблюдений кажутся спонтанно обращающимися по глубине (что, конечно, весьма затрудняет их визуальное исследование) [1]. Отметим, что изучение восприятия неоднозначных изображений ведется сегодня весьма активно, и, в определенном смысле, подобные объекты являются хорошей моделью в нейронауке как вообще зрительного восприятия окружающего мира, так и процесса принятия решения. Долгое время такие изображения были предметом исследования исключительно психологов [2, 3], однако, в последнее время механизмами восприятия неоднозначных изображений заинтересовались физики и математики [4, 5].

Несмотря на пристальное внимание исследователей, основной механизм интерпретации изображения до сих пор полностью не раскрыт, хотя уже хорошо известно, что восприятие является результатом нелинейных процессов, происходящих в распределенной нейронной сети затылочной, теменной и лобной областей коры головного мозга [6, 7]. Существует гипотеза, что переключение восприятия при наблюдении неоднозначных изображений связано с шумом, присущим системе взаимодействующих нервных клеток (например, фоновая нейронная активность в результате случайно генерируемых разрядов) [8, 9]. Тогда, в случае неоднозначного изображения мозг человека моделируется некой динамической системой с двумя выделенными состояниями равновесиями, а присутствующий шум способен вызывать переход динамики системы с одного аттрактора на другой. Таким образом, фоновая активность нейронов («внутренний шум» нейронной сети) играет решающую роль, как при интерпретации неоднозначных изображений, так и в других случаях принятия решений. С точки зрения такого подхода восприятие неоднозначного объекта может

быть описано и промоделировано в терминах простых стохастических процессов, таких как винеровская динамика [10–13]. Понятно, что определение и выявление механизмов данного процесса принятия решения открывает широкие перспективы для понимания, предсказания и возможной коррекции поведения сложной динамической системы со стохастической компонентой, включая человека.

Настоящее исследование лежит в рамках описанного теоретического подхода и направлено на исследование явления когнитивного шума, которое определяет то или понимание субъектом предъявляемого реверсивного изображения куба Неккера. В рамках исследований нами был введен параметр неоднозначности, соответствующий интенсивности яркости граней куба, который может варьироваться исследователем. Очевидно, что, если центральные грани куба Неккера будут практически не видны, то такой объект будет практически однозначно восприниматься как куб, повернутый направо, и, в случае отсутствующих боковых граней – как куб, повернутый налево. Таким образом, у исследователя появляется возможность варьировать параметр неоднозначности и одновременно исследовать собственный «порог» однозначного восприятия объекта у испытуемого. Дизайн эксперимент был выбран следующим. Для проводимых исследований выбирались условно здоровые испытуемые без проблем со зрением или с компенсированными имеющимися ограничениями. Испытуемый наблюдал куб Неккера в течение 1–2 секунд, отмечал своё восприятие объекта, как «левого» или «правого» с помощью нажатия на кнопку пульта, затем следовала пауза длительностью около 2–3 секунд, в течение которых испытуемому предъявлялось статичное нейтральное фоновое изображение без выраженных точек захвата внимания. Эксперимент включал в себя серии опытов, в рамках которых были выполнены предъявления различных наборов изображений, направленных на исследование как максимальной, так и минимальной неоднозначности двойственных изображений. В рамках всех экспериментов производилась регистрация фоновой записи – добровольца в свободном состоянии с открытыми глазами непосредственно перед и после активной фазы эксперимента.

В первую очередь, экспериментально полученные данные были обработаны статистическими методами, была построена модель, описывающая двухстабильную динамическую систему с когнитивным шумом на базе одномерного уравнения Фоккера-Планка [14, 15], результаты моделирования и эксперимента продемонстрировали хорошее соответствие с классическим теоретическим подходом. Затем, явление когнитивного шума было исследовано при анализе как внутренних шумов, обусловленных нейрофизиологическими процессами субъекта, и фактора неоднозначности, присутствующего в объекте исследования. Подобная попытка отыскать объективное соответствие на ЭЭГ записях чисто теоретической модели является новым подходом и позволяет принципиально доказать адекватность модели, а кроме того лучше понять сам нейрофизиологический механизм возникновения феномена двойственности изображения.

В качестве математического инструмента обработки многоканальных данных ЭЭГ было выбрано непрерывное вейвлетное преобразование [16]:

$$W(s, t_0) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t - t_0}{s} \right) dt, \quad (1)$$

где $x(t)$ – временная реализация экспериментального сигнала, $\psi_{s, t_0}(t)$ – материнский вейвлет, s – временной масштаб, определяющий ширину вейвлета, символ "*" –

обозначает комплексное сопряжение. В качестве материнского вейвлета был использован комплексный вейвлет Морле:

$$\psi(\eta) = (1/\sqrt[4]{\pi}) \exp(j\Omega_0\eta) \exp(-\eta^2/2), \quad (2)$$

с параметром $\Omega_0 = 2\pi$, что обеспечивает однозначную взаимосвязь между временным масштабом s вейвлетного преобразования и частотой f фурье-преобразования, а именно $f = 1/s$. Вейвлетный анализ является на сегодня одним из наиболее мощных математических инструментов для обработки сложных нестационарных зашумленных данных, ограниченных достаточно короткими временными рядами [16, 17]. Материнский вейвлет Морле хорошо зарекомендовал своё применение в нейрокогнитивных исследованиях полученными ранее хорошими результатами его применимости к ЭЭГ данным у людей и животных [16, 18].

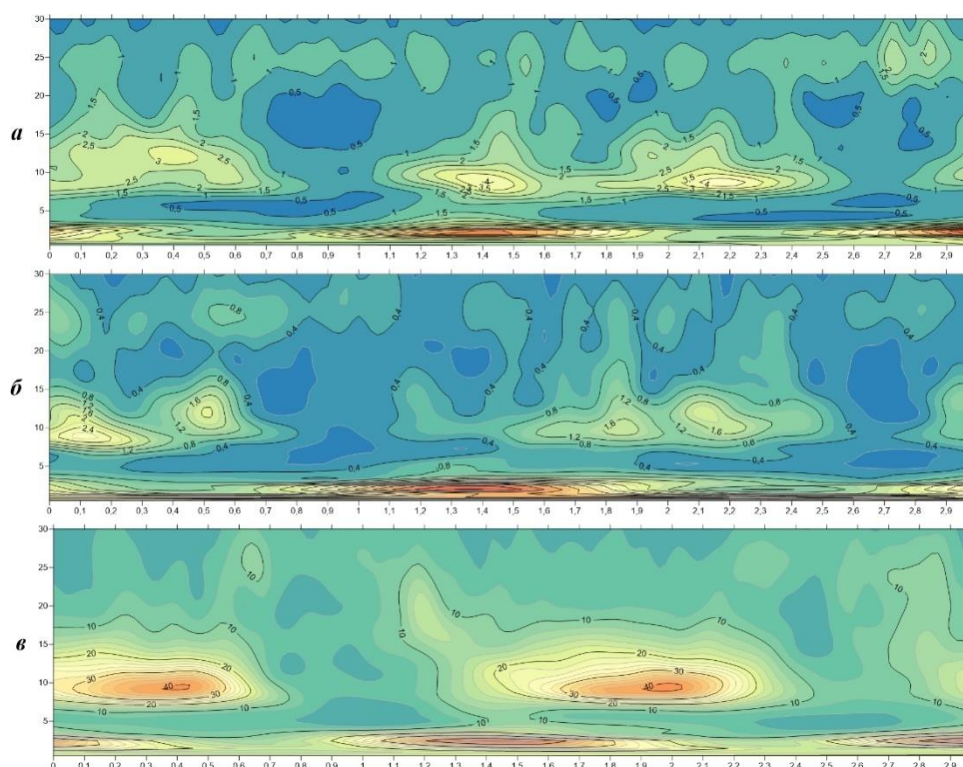


Рис. 1. Усреднённая вейвлетная характеристика, рассчитанная по фрагментам записей ЭЭГ канала O2 (затылочное отведение), соответствующим восприятию неоднозначного куба Неккера с различными параметрами интенсивности грани: $aI = 40$, $bI = 64$, $vI = 85$

Для многоканальных записей ЭЭГ были рассчитаны вейвлетные поверхности на диапазоне частот от 2 до 45 Гц. Отметим, что диапазон частот, на которых наблюдались процессы, тесно связанные с предъявлением неоднозначных объектов, менялся для различных испытуемых. Однако, в докладе мы рассмотрим результаты для испытуемого № 3, результаты которого продемонстрировали весьма высокую повторяемость и могут быть соотнесены с результатами прочих измерений. Методика исследования заключалась в построении усреднённых вейвлетных характеристик, отвечающих одним и тем же событиям, т.е. предъявлению одного и того же объекта (куба Неккера с выбранным параметром интенсивности) и выбором его испытуемым одним и тем же образом от события к событию. Методика напоминает метод вызванных потенциалов, но предоставляет большее количество информации на более

длительных временных интервалах (рис. 1). С помощью предлагаемой методики удалось продемонстрировать мощную низкочастотную компоненту, возникающую в затылочной зоне головного мозга испытуемого. Анализ имеющихся данных позволяет связать данную компоненту с процессом выбора в случае сильной неоднозначности объекта. Кроме того, было показано, что в одно и то же время на ЭЭГ данных при наблюдении неоднозначных объектов присутствуют мощные низкочастотные колебания (от 2 до 6 Гц для различных испытуемых), пространственное возникновение которых связано с двумя некими центрами головного мозга, лежащими в затылочной и лобной областях. По всей видимости, наличие этой колебательной активности вызвано именно двумя различными процессами, что косвенно доказывается проведением исследования пространственного распределения по различным каналам ЭЭГ, которое включило себя расчёт меры синхронизации различных каналов на исследуемых низких частотах.

Таким образом, были проведены нейрокогнитивные экспериментальные работы, построена одномерная теоретическая модель, зависящая от объективного параметра неоднозначности (интенсивности граней куба Неккера) и продемонстрировано её хорошее соответствие экспериментальным результатам. Затем, на базе зарегистрированных ЭЭГ данных добровольцев были проведены оценки и проведены параллели между теоретическими построениями и объективно регистрируемыми данными в ходе проведения психологических экспериментов по восприятию реверсивных изображений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 16-12-10100) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-32-00187 и 16-32-60078).

ЛИТЕРАТУРА

1. L.A.Necker // London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science. 1832. 5 (1).
2. D.A.Leopold, N.K.Logothetis // Trends in Cognitive Sciences. 1999. № 3. p. 254.
3. P. Sterzer et al. // Trends Cogn Sci., 2009. 13(7), p. 310
4. G.M.Long, T.C.Toppino// Psychological Bulletin, 2004, 130 (5), p. 748
5. J. Kornmeier et al. // Brain and Cognition, 2009, 69 (1), p. 138
6. F. Tong, M. Meng , R. Blake // Trends in Cognitive Sciences 2006 10, p. 502
7. P. Sterzer, A. Kleinschmidt, G. Rees // Trends in Cognitive Sciences 2009 13 p. 310
8. G. Gigante et al. // PLoS Computational Biology 2009 5, e1000430
9. I. Merk, J. Schnakenberg // Biological Cybernetics 2002 86 p. 111
10. D. J.Aks, J. C.Sprott // Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences 2003 7, p. 161
11. R. Ratcliff, P.L. Smith // Psychological Review 2004 111, p. 333
12. H.R.Heekeren, S. Marrett, L.G. Ungerleider // Nature Reviews Neuroscience 2008 9, p. 467
13. X. J.Wang // Current Opinion in Neurobiology 2012 22, p. 1039
14. R. Blake, N.K.Logothetis // Nature Reviews. Neuroscience. 2002 3 p. 13.
15. Pisarchik A. N. et al. //Biological Cybernetics. 2014 108. p. 397.
16. A.E.Hramov et. al. // Wavelets in Neuroscience. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2015
17. А.Е.Пуннова и др. “Вейвлеты в геофизике: обработка сигналов в сейсморазведке” Москва: Издательство "УНИВЕРСИТЕТСКАЯ КНИГА", 2013.
18. E.Yu.Sitnikova et. al. //Neuroscience Journal. 2014 370764