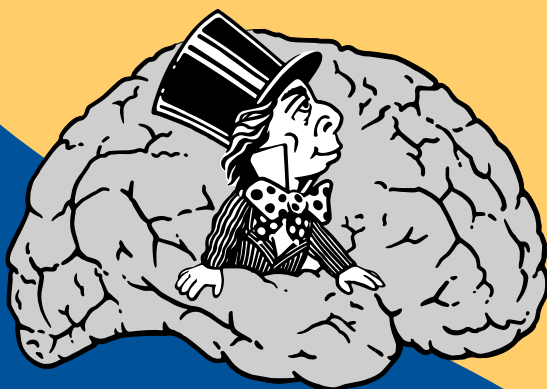


КОГНИТИВНАЯ НАУКА

В МОСКВЕ



НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

МАТЕРИАЛЫ
КОНФЕРЕНЦИИ
2019

Под ред. Е.В. Печенковой, М.В. Фаликман

УДК 159.9
ББК 88.25
К57

Когнитивная наука в Москве: новые исследования. Материалы конференции 19 июня 2019 г. Под ред. Е. В. Печенковой, М. В. Фаликман. – М.: ООО «Буки Веди», ИППиП. 2019 г. – 656 стр.

ISBN 978-5-4465-2346-7

УДК 159.9
ББК 88.25

ISBN 978-5-4465-2346-7

©Авторы статей, 2019

РАЗЛИЧИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СВЯЗАННОСТИ МОЗГОВОЙ АКТИВНОСТИ ПРИ ОТКРЫТЫХ И ЗАКРЫТЫХ ГЛАЗАХ

И. В. Фекличева* (1), И. М. Захаров (2), Н. А. Чипеева (1),
Е. К. Масленникова (1), Т. Адамович (3), В. И. Исмагуллина (2)
feklichevaiv@susu.ru

1 – ЮУрГУ, Челябинск; 2 – ПИ РАО, Москва; 3 – МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва

Аннотация. Настоящее исследование посвящено анализу различий в показателях связанности мозговой активности по данным ЭЭГ в состоянии спокойного бодрствования при открытых и закрытых глазах. Выборку исследования составили 37 здоровых респондентов (33% женщин) в возрасте от 17 до 30 лет. Состояние спокойного бодрствования регистрировалось в течение 10 минут (6 минут закрытые глаза, 4 минуты открытые глаза) с помощью 64-канального энцефалографа Brain Products. Согласно полученным результатам в альфа-диапазоне функциональная связанность при закрытых глазах снижается, но при этом повышается степень сегрегации и увеличивается плотность связи между модулями графа. В высокочастотном бета-диапазоне функциональная связанность снижается при открытых глазах. В тета-диапазоне функциональная связанность выше при закрытых глазах, при этом узловая структура представляется более разреженной по сравнению с открытыми глазами. Полученные нами данные свидетельствуют о необходимости учета типа регистрации физиологической активности (открытые или закрытые глаза) при описании характеристик связанности мозговой активности в состоянии спокойного бодрствования.

Ключевые слова: нейронные сети мозга, функциональная связанность, теория графов, ЭЭГ, состояние спокойного бодрствования

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-013-00944.

Введение

Одним из перспективных направлений изучения динамики мозговой активности является «сетевой подход», согласно которому сети в мозге могут быть представлены как граф, в котором отдельные структуры рассматриваются как узлы графа, а связи между ними – как ребра. Различные метрики графа (характеристики связанности) в таком случае могут быть связаны со структурными и функциональными характеристиками мозга. К настоящему моменту показано, что сети в мозге, например, имеют характеристики *small world*, то есть большое количество узлов графа связаны между собой малым количеством

узлов со значительным количеством связей (van den Heuvel, Sporns, 2011). Показатели связанности мозга являются устойчивой индивидуальной характеристикой (Finn et al., 2015), а также могут быть связаны с личностными особенностями, когнитивными способностями (Markett et al., 2013, Geerligs et al., 2015, Beaty et al., 2018) и даже выраженностью психопатологической симптоматики, а также меняться в зависимости от функционального состояния мозга (Buckholz, Meyer-Lindenberg, 2012).

Чаще всего оценка показателей функциональной связанности мозговой активности производится, когда участник исследования находится в состоянии спокойного бодрствования. При этом среди исследователей нет единства относительного того, с открытыми или закрытыми глазами должен находиться человек при регистрации физиологических сигналов. Вместе с тем характеристики функциональной связанности могут различаться в состоянии покоя при открытых и закрытых глазах. Так, например, в исследовании Ху и соавторов (2014) с использованием данных фМРТ на 23 здоровых испытуемых показано, что функциональные сети при открытых глазах по сравнению с закрытыми глазами характеризовались достоверно большим коэффициентом кластеризации, нормализованной длиной кратчайшего пути и локальной эффективностью, но значительно меньшей глобальной эффективностью. Авторы предполагают, что данные различия функциональной связанности при открытых и закрытых глазах могут быть связаны с увеличением специализированной обработки информации наряду с уменьшением интегрированной обработки информации в режиме открытых глаз (по сравнению с закрытыми глазами). Сходные данные были получены Тап и соавторами (2013) в исследовании изменения характеристик функциональной связанности при открытых и закрытых глазах в разных частотных диапазонах по данным ЭЭГ. В данном исследовании было показано, что в тета-диапазоне коэффициент кластеризации был значимо выше при закрытых, чем при открытых глазах, как и коэффициент центральности во фронтальных областях. В альфа-диапазоне коэффициент кластеризации и локальная эффективность были выше при закрытых глазах, а глобальная эффективность была ниже. В бета-диапазоне значимых различий в характеристиках функциональной связанности при открытых и закрытых глазах выявлено не было. Полученные данные об изменении характеристик функциональной связанности могут быть связаны с различными режимами обработки информации при закрытых и открытых глазах. Таким образом, особенности состояния, в котором регистрируется активность мозга, могут существенно влиять на оценку показателей связанности.

В настоящей работе нашей целью было воспроизвести результаты, полученные Тап и коллегами (2013), а также расширить представления о различиях в работе мозга при открытых и закрытых глазах добавлением новых метрик графа, характеризующих связанность сетей мозга. Для анализа нами были выбраны такие характеристики графа, как коэффициент кластеризации, длина пути, модулярность, собственный вектор центральности, близость центральности и диаметр графа. Оценка данных метрик позволит уточнить особенности функциональной связанности графа и его узловой структуры при открытых и закрытых глазах.

Методика

Выборку исследования составили 37 здоровых респондентов (33% женщин) в возрасте от 17 до 30 лет. Все участники не имели в анамнезе неврологических и психиатрических расстройств и травм головы. Регистрация электроэнцефалограммы осуществлялась в состоянии покоя в течение 10 минут (по 2 минуты открытые и закрытые глаза). Данные ЭЭГ записывались с 64 активных электродов, размещенных по международной системе 10–10 с усилителем ActiChamp Brain Products (Brain Products, Мюнхен, Германия). Все эксперименты проводились в звуконепроницаемой и электрически экранированной комнате с тусклым освещением. Для снижения сопротивления использовался высокопроводящий гель, диапазон сопротивления был от 0 кОм до 25 кОм. Сбор данных проводился без предварительной фильтрации с частотой дискретизации 500 и референтным электродом в отведении Cz. При анализе данных частота дискретизации была снижена до 256 Гц, данные были отфильтрованы от 0.1 Гц до 30 Гц, затем был проведен ре-референс к усредненному электроду. Далее данные вручную очищались от артефактов с исключением шумных каналов. Для удаления артефактов моргания и вертикального движения глаз на основе ICA в качестве глазодвигательных электродов использовались VEOG – Fr1, НEOG – FT9 и FT10. После ICA исключенные каналы были топографически интерполированы, и было проведено полуавтоматическое удаление артефактов. Оценка синхронизации ЭЭГ-активности производилась с помощью библиотеки MNE Python (Gramfort et al., 2014). Для оценки силы связи между каналами использовался метод weighted Phase Lag Index (wPLI, Hardmeier et al., 2014), разработанный для минимизации проблемы объемного проведения сигнала в ЭЭГ. При подсчете метрик графа связь между узлами графа не бинаризовалась, использовались градуальные веса связей. Для анализа метрик связности использовались значения, значения которых были выше медианного для каждого испытуемого. Подсчет метрик связности был проведен с помощью пакета igraph (<https://igraph.org/>). Статистическая обработка данных была проведена в среде статистического программирования R (R Core Team, 2018).

Результаты

Наибольшее число значимых различий в показателях функциональной связанности при открытых и закрытых глазах наблюдалось в альфа-диапазоне (8–13 Гц): кластерный коэффициент, характерная длина пути, плотность, собственный вектор центральности были значимо выше, а показатели модулярности и близости центральности – значимо ниже при закрытых глазах. В диапазоне 13–20 Гц (низкочастотный бета-ритм) значимых различий в показателях функциональной связанности при открытых и закрытых глазах не было выявлено. В диапазоне 20–30 Гц (высокочастотный бета-ритм) характерная длина пути была значимо ниже при закрытых глазах, чем при открытых. В тета-диапазоне (4–8 Гц) значимо различались диаметр (показатель выше при закрытых глазах) и близость центральности (показатель выше при открытых глазах). Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Различия между показателями функциональной связанности мозговой активности в состоянии спокойного бодрствования при открытых и закрытых глазах

Показатели связности	α -ритм (8 – 13 Гц)	β -ритм 1 (13 – 20Гц)	β -ритм 2 (20 – 30Гц)	θ -ритм (4 – 8Гц)
	Средние различия	Средние различия	Средние различия	Средние различия
Плотность	.249 ^{***}	-.005	-.011	-.004
Характерная длина пути	.957 ^{***}	-.006	-.045 ^{***}	.026
Коэффициент кластеризации	.201 [*]	-.003	.003	.001
Модулярность	-.011 ^{**}	.001	.002	-.007
Собственный вектор центральности	.022 ^{***}	-.004	-.011	-.015
Диаметр	.243	.021	-.055	.105 ^{***}
Близость центральности	-.008 ^{***}	-.002	.002	-.004 [*]

Примечание. Показатели средних различий принимают отрицательные значения, если средние значения метрик связанности при открытых глазах выше, чем при закрытых, а положительные значения – если средние значения метрик выше при закрытых глазах.
* $p \geq .05$; ** $p \leq .01$; *** $p \leq .005$; **** $p \leq .001$

Обсуждение и выводы

В настоящем исследовании мы воспроизвели предыдущие результаты относительно различий между характеристиками функциональной связанности в состоянии спокойного бодрствования с открытыми и закрытыми глазами, а также расширили их на основе данных о новых метриках графа, характеризующих связанность сетей мозга. Согласно полученным результатам, в альфа-диапазоне функциональная связанность при закрытых глазах снижается, но при этом повышается степень сегрегации и увеличивается плотность связи между модулями графа. В высокочастотном бета-диапазоне функциональная связанность снижается при открытых глазах. В тета-диапазоне функциональная связанность выше при закрытых глазах, при этом узловая структура представляется более разреженной по сравнению с открытыми глазами. Изменения в показателях функциональной связанности в тета-диапазоне при открытых глазах могут свидетельствовать об ингибировании активности сети пассивного режима работы мозга (Chen et al., 2008; Raichle et al., 2001; Klimesch et al., 1999). Полученные результаты также могут указывать на то, что при открытых глазах происходит подавление сенсорных модальностей (отличных от зрительных) для выделения ресурсов для экстероцептивной обработки информации. В целом полученные нами данные свидетельствуют о необходимости учета типа регистрации физиологической активности (открытые или закрытые глаза) при описании характеристик связанности мозговой активности в состоянии спокойного бодрствования.

Литература

Beatty R. E., Kenett Y. N., Christensen A. P., Rosenberg M. D., Benedek M., Chen Q., Fink A., Qiu J., Kwapił T. R., Kan M. J., Silvia P. J. Robust prediction of individual creative ability from brain functional connectivity // PNAS. 2018. Vol. 115. No. 5. P. 1087 – 1092. doi:10.1073/pnas.1713532115

Bo T., Kong X., Yang P., Jin Z., Li L. The difference of brain functional connectivity between eyes-closed and eyes-open using graph theoretical analysis // Computational and Mathematical Methods in Medicine. 2013. Vol. 2013. P. 1 – 15. doi:10.1155/2013/976365

Buckholtz J. W., Lindenberg A. M. Psychopathology and the human connectome: Toward a transdiagnostic model of risk for mental illness // *Neuron*. 2012. Vol. 74. No. 6. P. 990–1004. doi:10.1016/j.neuron.2012.06.002

Chen A. C. N., Feng Y. I., Zhao H. X. EEG default mode network in the human brain: Spectral regional field powers // *International Journal of Psychophysiology*. 2008. Vol. 69. No. 3. P. 184–185. doi:10.1016/j.ijpsycho.2008.05.490

Finn E. S., Shen X., Scheinost D., Rosenberg M. D., Huang J., Chun M. M., Constable R. T. Functional connectome fingerprinting: Identifying individuals using patterns of brain connectivity // *Nature Neuroscience*. 2015. Vol. 18. No. 11. P. 1664–1671. doi:10.1038/nn.4135

Geerligs L., Rubinov M., Cam-CAN, Henson R. N. State and trait components of functional connectivity: Individual differences vary with mental state // *Journal of Neuroscience*. 2015. Vol. 35. No. 41. P. 13949–13961. doi:10.1523/jneurosci.1324-15.2015

Gramfort A., Luessi M., Larson E., Engemann D., Strohmeier D., Brodbeck C., Parkkonen L., Hämäläinen M. MNE software for processing MEG and EEG data // *NeuroImage*. 2014. Vol. 86. P. 446–460. doi:10.1016/j.neuroimage.2013.10.027

Hardmeier M., Hatz F., Bousleiman H., Schindler C., Stam C., Fuhr P. Reproducibility of functional connectivity and graph measures based on the phase lag index (PLI) and weighted phase lag index (wPLI) derived from high resolution EEG // *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9. No. 10. P. e108648. doi:10.1371/journal.pone.0108648

van den Heuvel M. P., Sporns O. Rich-club organization of the human connectome // *Journal of Neuroscience*. 2011. Vol. 31. No. 44. P. 15775–15786. doi:10.1523/JNEUROSCI.3539-11.2011

Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: A review and analysis // *Brain Research Reviews*. 1999. Vol. 29. No. 2–3. P. 169–195. doi:10.1016/s0165-0173(98)00056-3

Markett S., Weber B., Voigt G., Montag C., Felten A., Elger C., Reuter M. Intrinsic connectivity networks and personality: The temperament dimension harm avoidance moderates functional connectivity in the resting brain // *Neuroscience*. 2013. Vol. 240. P. 98–105. doi:10.1016/j.neuroscience.2013.02.056

Raichle M. E., MacLeod A. M., Snyder A. Z., Powers W. J., Gusnard D. A., Shulman G. L. A default mode of brain function // *PNAS*. 2001. Vol. 98. No. 2. P. 676–682. doi:10.1073/pnas.98.2.676

Xu P., Huang R., Wang J., Dam N. T. V., Xie T., Dong Z., Chen C., Gu R., Zang Y.-F., He Y., Fan J., Luo Y.-j. Different topological organization of human brain functional networks with eyes open versus eyes closed // *NeuroImage*. 2014. Vol. 90. No. 15. P. 246–255. doi:10.1016/j.neuroimage.2013.12.060

DIFFERENCES IN FUNCTIONAL CONNECTIVITY OF BRAIN ACTIVITY WITH EYES OPEN AND CLOSED

I. V. Feklicheva* (1), I. V. Zakharov (2), N. A. Chipeeva (1), E. P. Maslennikova (1), T. Adamovich (3), V. I. Ismatullina (2)

feklichevaiv@susu.ru

1 – South Ural State University, Chelyabinsk; 2 – Psychological Institute Russian Academy of Education, Moscow; 3 – Moscow State University, Moscow

Abstract. The present study is devoted to the analysis of differences in brain activity metrics according to EEG data in the state of calm wakefulness with open and closed eyes. The study sample consisted of 37 healthy respondents (33 % women) aged 17 to 30 years.

The state of calm wakefulness was recorded for 10 minutes (6 minutes closed eyes, 4 minutes open eyes) using 64-channel encephalograph by Brain Products. According to the results obtained in the alpha range, functional connectivity with closed eyes decreased, but the extent of segregation increased and the density between the graph modules increased. In the high-frequency beta range, functional connectivity was reduced when the eyes are open. In the theta range, functional connectivity was higher when the eyes are closed, and the nodal structure appears to be sparser than when the eyes are open. The data indicate the need to take into account the type of registration of physiological activity (open or closed eyes) in the description of the characteristics of the functional connectivity of brain activity in a state of calm wakefulness.

Keywords: neuronal brain networks, functional connectivity, graph theory, EEG, calm wakefulness