

РОЛЬ ОСЦИЛЛЯТОРНОЙ АКТИВНОСТИ МОЗГА В ОСУЩЕСТВЛЕНИИ КОГНИТИВНОГО КОНТРОЛЯ ВНИМАНИЯ

А.О. ТАБУЕВА*

ФГБНУ «Психологический институт РАО», Москва

В обзорной статье представлены сведения о психофизиологических механизмах функционирования когнитивного контроля внимания. Показано, что, помимо особенностей структурной организации, наиболее эффективный контроль внимания осуществляется в том числе за счет свойств пространственно-временной динамики функциональных связей мозга. Подчеркивается роль динамической функциональной связности и ее изменчивости во времени как источника индивидуальных различий в когнитивном контроле.

Ключевые слова: когнитивный контроль, управляющие функции, осцилляторная активность, функциональная связность.

DOI: 10.24412/2073-0861-2021-3-71-81

Введение

Индивидуальные различия в когнитивном контроле связаны с общей продуктивностью деятельности, влияя на измерения индивидуальных различий в широком спектре когнитивных способностей, включая флюидный интеллект и объем рабочей памяти (Engle, 2018 [24]; Kovacs & Conway, 2016 [40], 2019 [41]). Когнитивный контроль – это обобщающий термин, который, согласно наиболее современному пониманию, можно определить как способность гибко корректировать поведение в контексте динамически меняющихся целей и требований задач (Carter & Krug, 2012 [13]; Niendam et al., 2012 [48]). В этом смысле когнитивный контроль выступает в качестве фундаментального процесса, кодирующего представление текущей задачи и указывающего для этой задачи исполнительные функции, включая исполнительный контроль внимания, обновление (например, рабочую память), переключение

и торможение (Hughes, 2011 [35]; Botvinick & Braver, 2015) [9]), а также оптимизацию эмоциональных и моторных действий (Botvinick & Cohen, 2014 [10]; Nigg, 2017 [49]).

Высокие оценки наследуемости компонентов когнитивного контроля, очевидно, говорят о связи индивидуальных различий в этих способностях с особенностями структуры и функций нервной системы (Plomin & Kovas, 2005 [53]; Friedman & Miyake, 2008 [27]; Deary et al., 2021 [20]), что подчеркивает потенциал исследований нейрофизиологических механизмов когнитивного контроля как опосредующего звена в цепи «ген – поведение». Развитие методов нейровизуализации позволило идентифицировать комплексы мозговых отделов, участвующих в осуществлении когнитивного контроля, а также свойства их функциональной структуры (Ambrosini et al., 2019 [2]; Menon & D'Esposito, 2021 [47]). В то же время оптимальное функционирование когнитивных систем мозга обеспечивается эффективностью передачи сигнала внутри нервной системы, отраженной в интегральных характеристиках осцилляторной активности мозга (Fries, 2015 [28]; Jiang et al., 2019 [38]).

Понимание механизмов взаимосвязи между индивидуальными различиями в

© Табуева А.О., 2021

* Для корреспонденции:

Табуева Анна Олеговна

младший научный сотрудник ПИ РАО

E-mail: anntabueva@gmail.com

характеристиках мозговой активности и успешностью решения задач является одной из фундаментальных задач для когнитивной нейронауки. Построение общей теоретической модели механизмов осуществления когнитивного контроля внимания, учитывающей современные представления о значимых свойствах нейрофизиологической активности как основы индивидуальных различий, внесет значимый вклад в анализ структуры когнитивных способностей и источников индивидуальной вариативности успешности человека при решении когнитивных задач разного типа.

Функциональные сети когнитивного контроля внимания

Традиционно функции когнитивного контроля связывались именно с работой фронтальных зон: считалось, что префронтальная кора (ПФК) выступает центром регулирования и управления процессами познания и поведения (Stuss & Benson, 1984 [64]; Goldman-Rakic, 1995 [31]). Целый ряд нейровизуализационных исследований подтверждал гипотезу модульности функций внутри ПФК (Fuster, 2015) [30]. Кроме ПФК, исследования также демонстрировали вовлеченность целого ряда других областей. В результате этого были выявлены надежно идентифицируемые сети мозга во главе с ПФК, отвечающие за осуществление когнитивного контроля внимания: лобно-теменная (FPN) сеть, значимая сеть (Salience Network, SN), цингуло-оперкулярная сеть (Cingulo-Opercular Network, CON), сеть режима «по умолчанию» (Default Mode Network, DMN), а также дорсальные (Dorsal Attention Network, DAN) и вентральные (Ventral Attention Network, VAN) сети внимания (Shirer et al., 2012 [60]; Menon & D'Esposito, 2021 [47]). Охватывая области ассоциативной, лобной, теменной, височной и поясной коры, эти сети действуют как самостоятельные функциональные единицы и выполняют различные когнитивные функции (Bertolero et al., 2015) [8].

Так, согласно двойной модели нисходящего контроля, сеть CON управляет хранением информации в длительном масштабе времени – то есть участвует в поддержании тонической бдительности (Sadaghiani & D'Esposito, 2015 [56]; Wallis et al., 2015 [66]), в то время как сеть FPN осуществляет фазовый контроль бдительности (Cai et al., 2016 [12]; Sadaghiani & Kleinshmidt, 2016 [57]). Сеть DAN участвует в нисходящем отборе стимулов и ответов, тогда как VAN отслеживает поведенчески релевантные стимулы и может действовать как «выключатель цепи» для DAN (Corbetta & Shulman, 2002 [18]; Menon & D'Esposito, 2021 [47]). В процессах торможения участвуют сети SN, CON и VAN; однако их функциональные роли и сетей пока остаются не ясны (Lemire-Rodger et al., 2019 [44]; Wu et al., 2019 [67]). Предполагается, что сеть SN инициирует соответствующие переходные управляющие сигналы для управления активности сетей FPN и DMN: включение FPN при отключении DMN позволяет отключиться от внутренних психических процессов, чтобы реагировать на текущие цели, в то время как невозможность отключить DMN во время восприятия, вызванного внешним стимулом, значительно ухудшает выполнение задачи (Sridharan et al., 2008 [63]; Douw et al., 2016 [22]).

Однако попытка определить однозначные и независимые функции определенных сетей, или, иными словами, обнаружить «специальные процессоры» в головном мозге, которые участвуют в когнитивном контроле, на сетевом уровне могут рассматриваться как «френологические» (Friedman et al., 2017 [26]; Menon & D'Esposito, 2021 [47]; Zink et al., 2021 [68]). Фактически, то, что эти сети являются функционально различными единицами, не исключает возможности их гибкого взаимодействия для осуществления когнитивного контроля. Важно отметить, что когнитивный контроль реализуется не одной отдельной сетью, а скорее динамическим взаимодействием между «префронталь-

ными» сетями, встроенными в глобальную архитектуру мозга (Cocchi et al., 2013) [16]. Хотя эти сети и являются самостоятельными единицами, они не функционируют изолированно и демонстрируют сложный репертуар контекстно зависимых динамических взаимодействий друг с другом. Мы предполагаем, что именно характеристика пространственно-временных свойств динамики функциональных сетей мозга может предоставить фундаментальные знания об их роли в качестве когнитивных узлов для координации психических процессов.

Ритмическая синхронизация активности выступает в качестве инструмента передачи возбуждения как потока информации между отдельными нейронными ансамблями для связи удаленных участков мозга. Отмечается, что когерентная осцилляторная активность является ключевым фактором общения в системах, демонстрирующих колебательную активность (Fries, 2015 [28]; Avena-Koenigsberger et al., 2018 [6]). Целый ряд исследований отмечает связь индивидуальных различий в когнитивном контроле со свойствами осцилляторной активности альфа-ритма (Palva & Palva, 2011 [52]; Cooper et al., 2016 [17]; Gordon et al., 2018 [32]; Van Diepen et al., 2019 [65]), тета-ритма (Cavanagh & Frank, 2014 [14]; de Vries et al., 2020 [19]), асимметрии альфа- и бета-ритмов во фронтальных отведениях (Ambrosini & Vallesi, 2016 [3]; Spitzer & Haegens, 2017 [62]), а также связанных с событиями потенциалами в теменных отведениях и префронтальных отделах коры (Jamadar et al., 2015 [37]; Heidlmayr et al., 2020 [34]). Широкое обсуждение эффективного взаимодействия сетей мозга внутри и между собой позволило частично прояснить функциональную роль синхронной осцилляторной активности в осуществлении когнитивного контроля (Fries et al., 2016) [29]. Так, управление фазовым контролем осуществляется префронтальной сетью FPN за счет богатого репертуара длительной синхрониза-

ции периодических циклов ингибирования альфа-ритма, влияя таким образом на растормаживание областей мозга, работа которых необходима для решения задачи (Sadaghiani and Kleinschmidt, 2016) [57]. В свою очередь, динамическая гибкость функциональных связей сети SN, выполняющей роль «переключателя», также демонстрирует одну из наибольших дисперсий возможных значений по сравнению с другими мозговыми сетями и в том числе позволяет прогнозировать индивидуальные различия в когнитивной гибкости (Krönke et al., 2020) [42]. Эти результаты говорят о том, что эффективное взаимодействие, необходимое для сложных процессов познания, основано на высокой сложности и разнообразии репертуара взаимодействия областей мозга между собой. Это свидетельствует в пользу необходимости более внимательного подхода к изучению свойств осцилляторной активности как во время выполнения когнитивных задач, так и в состоянии покоя.

Осцилляторная активность мозга как свойство динамической системы

Для понимания имманентных свойств осцилляторной активности, играющих роль как в решении задач, так и в покое, следует обратиться к рассмотрению нейрофизиологических процессов как результата активности сложной самоорганизующейся динамической системы (Deco & Jirsa, 2012 [21]; Fingelkurts et al., 2013 [25]). В самом деле, сложность функциональных связей сети способствует возникновению самоорганизующейся критичности в активности нейронных ансамблей (Kitzbichler et al., 2009 [39]; Cocchi et al., 2017 [15]; Massobrio et al., 2019 [46]). В основе функционирования на грани сбалансированного критичного состояния лежит пространственно-временная динамика мозга, тонко сбалансированная между порядком и беспорядком – затуханием активности или неразборчивым вовлечением всех единиц

системы (Poil et al., 2012 [54]; Arviv et al., 2015 [4]; Atasoy et al., 2019 [5]). Опираясь на большой набор доступных возможных динамических связей и расширяя его (Song et al., 2019) [61], спектр изменчивости функциональной связности предположительно отражает функциональные состояния мозга, такие же, как состояния глубокого сна, пассивного бодрствования или состояния покоя (Palva and Palva, 2007 [51]; Fingelkurts et al., 2013 [25]; Lee et al., 2019 [43]).

Двумя возможными измерениями, в которых может быть оценена и описана внутренняя динамика нейронных колебаний, являются пространство и время. Последние годы исследований отмечены возникновением нового направления в оценке функциональной связности, связанной с задачами, а именно: интерес к описанию временной динамики функциональных связей, в том числе функциональной реорганизации мозга согласно требованиям задачи (Cocchi et al., 2016 [16]; Gratton et al., 2018 [33]). Во-вторых, развитие методов позволило оценивать изменчивость, или нестационарность, функциональной связности во времени в рамках одного состояния мозга. Результаты немногих исследований уровня оксигенации крови больших полушарий позволяют предположить, что снижение изменчивости функциональной связности во время выполнения задания зависит от точности выполнения (Elton & Gao, 2015 [23]; Shine et al., 2018 [59]; Alba et al., 2019 [1]). Однако исследования в области оценки динамической изменчивости именно осцилляторной электрофизиологической активности для этих двух направлений отсутствуют. Изучение потенциальных эффектов изменчивости функциональной связности на результаты выполнения задач может открыть новые возможности изучения нейрофизиологических коррелятов когнитивного контроля.

С точки зрения поведения во времени, колебания мозга демонстрируют специфические характеристики, присущие таким самоорганизованным сложным системам, как

мозг, и во время выполнения задания, и в состоянии покоя. Динамика нейрональной активности в такой системе имеет форму «лавины»: она характеризуется высокой степенью самоподобия во времени и проявляет себя в качестве степенных отношений во временной изменчивости сигнала (Nikulin and Brismar, 2005 [50]; Poil et al., 2012 [54]). Самоподобие, или фрактальность, обеспечивает память внутри нейронной системы и высокую чувствительность к внешним возмущениям (Shin and Kim, 2004 [57]; Rubinov et al., 2011 [54]), в связи с чем степенные отношения во временной изменчивости сигнала, измеренные как Длинно-Временные Корреляции (ДВК) в огибающей амплитуды сигнала, значительно влияют на индивидуальные различия в когнитивном контроле. В частности, было показано, что уменьшение ДВК во время выполнения задачи на внимание по сравнению с состоянием покоя коррелирует с лучшей производительностью, в то время как увеличение ДВК от состояния покоя к вниманию связано с пониженной производительностью (Irrmischer et al., 2018) [36]. В исследовании Mahjoory et al. (2019) [45] продемонстрирована положительная связь фазового когнитивного ДВК. Несмотря на врожденную природу и потенциал для построения общей теоретической модели механизмов осуществления когнитивного контроля внимания, роль ДВК в когнитивных процессах еще сравнительно плохо изучена.

Заключение

Рассмотрев результаты последних теоретических и экспериментальных исследований в области нейрофизиологических механизмов когнитивного контроля, мы отметили ключевую роль осцилляторной активности для наиболее эффективного динамического взаимодействия сетей мозга. Изучение взаимоотношений динамической функциональной связности и ее изменчивости с когнитивными способностями позволит не только улучшить наше понимание по-

тенциальных источников индивидуальных различий, но и открыть новые стратегии изучения механизмов когнитивного контроля.

Литература

1. *Alba G., Vila J., Rey B., Montoya P., Muñoz M.Á.* The relationship between heart rate variability and electroencephalography functional connectivity variability is associated with cognitive flexibility // *Frontiers in Human Neuroscience*. – 2019. – Vol. 13. – Art. 64. doi: 10.3389/fnhum.2019.00064.
2. *Ambrosini E., Arbula S., Rossato C., Pacella V., Vallesi A.* Neuro-cognitive architecture of executive functions: A latent variable analysis // *Cortex*. – 2019. – Vol. 119. – P. 441–456.
3. *Ambrosini E., Vallesi A.* Asymmetry in prefrontal resting-state EEG spectral power underlies individual differences in phasic and sustained cognitive control // *NeuroImage*. – 2016. – Vol. 124. – Pt. A. – P. 843–857.
4. *Arviv O., Goldstein A., Shriki O.* Near-critical dynamics in stimulus-evoked activity of the human brain and its relation to spontaneous resting-state activity // *Journal of Neuroscience*. – 2015. – Vol. 35. – No. 41. – P. 13927–13942.
5. *Atasoy S., Deco G., Kringelbach M.L.* Playing at the Edge of Criticality: Expanded Whole-Brain Repertoire of Connectome-Harmonics / In: *Tomen N., Herrmann J., Ernst U.* (eds.). *The Functional Role of Critical Dynamics in Neural Systems*. Springer Series on Bio- and Neurosystems. Springer, Cham. – 2019. – Vol. 11. – P. 27–45. doi: 10.1007/978-3-030-20965-0_2.
6. *Avena-Koenigsberger A., Misic B., Sporns O.* Communication dynamics in complex brain networks // *Nature Reviews Neuroscience*. – 2018. – Vol. 19. – No. 1. – P. 17–33.
7. *Baldassarre A., Lewis C.M., Committeri G., Snyder A.Z., Romani G.L., Corbetta M.* Individual variability in functional connectivity predicts performance of a perceptual task // *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*. – 2012. – Vol. 109. – No. 9. – P. 3516–3521.
8. *Bertolero M.A., Yeo B.T.T., D'Esposito M.* The modular and integrative functional architecture of the human brain // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2015. – Vol. 112. – No. 49. – E6798–E6807.
9. *Botvinick M., Braver T.* Motivation and cognitive control: From behavior to neural mechanism // *Annual Review of Psychology*. – 2015. – Vol. 66. – No. 1. – P. 83–113.
10. *Botvinick M.M., Cohen J.D.* The computational and neural basis of cognitive control: Charted territory and new frontiers // *Cognitive Science*. – 2014. – Vol. 38. – No. 6. – P. 1249–1285.
11. *Braver T.S., Kizhner A., Tang R., Freund M.C., Etzel J.A.* The dual mechanisms of cognitive control project // *Journal of Cognitive Neuroscience*. – 2021. – Vol. 33. – No. 9. – P. 1990–2015.
12. *Cai W., Chen T., Ryali S., Kochalka J., Li C.-S.R., Menon V.* Causal interactions within a frontal-cingulate-parietal network during cognitive control: Convergent evidence from a multisite-multitask investigation // *Cerebral Cortex*. – 2016. – Vol. 26. – No. 5. – P. 2140–2153.
13. *Carter C.S., Krug M.K.* *Dynamic Cognitive Control and Frontal-Cingulate Interactions / Cognitive Neuroscience of Attention*, 2nd ed. – New York, NY, US: Guilford Press, 2012. – P. 89–98.
14. *Cavanagh J.F., Frank M.J.* Frontal theta as a mechanism for cognitive control // *Trends in Cognitive Sciences*. – 2014. – Vol. 18. – No. 8. – P. 414–421.
15. *Cocchi L., Gollo L.L., Zalesky A., Breakspear M.* Criticality in the brain: A synthesis of neurobiology, models and cognition // *Progress in Neurobiology*. – 2017. – Vol. 158. – P. 132–152.
16. *Cocchi L., Zalesky A., Fornito A., Mattingley J.B.* Dynamic cooperation and competition between brain systems during cognitive control // *Trends in Cognitive Sciences*. – 2013. – Vol. 17. – No. 10. – P. 493–501.
17. *Cooper P.S., Darriba Á., Karayanidis F., Barceló F.* Contextually sensitive power changes across multiple frequency bands underpin cognitive control // *NeuroImage*. – 2016. – Vol. 132. – P. 499–511.
18. *Corbetta M., Shulman G.L.* Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain // *Nature Reviews Neuroscience*. – 2002. – Vol. 3. – No. 3. – P. 201–215.
19. *Vries I.E.J. de, Slagter H.A., Oliviers C.N.L.* Oscillatory control over representational states in working memory // *Trends in Cognitive Sciences*. – 2020. – Vol. 24. – No. 2. – P. 150–162.
20. *Deary I.J., Cox S.R., Hill W.D.* Genetic variation, brain, and intelligence differences // *Molecular Psychiatry*, 2021. doi: 10.1038/s41380-021-01027-y. Online ahead of print.

21. *Deco G., Jirsa V.K.* Ongoing cortical activity at rest: Criticality, multistability, and ghost attractors // *Journal of Neuroscience*. – 2012. – Vol. 32. – No. 10. – P. 3366–3375.
22. *Douw L., Wakeman D.G., Tanaka N., Liu H., Stufflebeam S.M.* State-dependent variability of dynamic functional connectivity between frontoparietal and default networks relates to cognitive flexibility // *Neuroscience*. – 2016. – Vol. 339. – P. 12–21.
23. *Elton A., Gao W.* Task-related modulation of functional connectivity variability and its behavioral correlations // *Human Brain Mapping*. – 2015. – Vol. 36. – No. 8. – P. 3260–3272.
24. *Engle R.W.* Working memory and executive attention: A revisit // *Perspectives on Psychological Science*. – 2018. – Vol. 13. – No. 2. – P. 190–193.
25. *Fingelkurts A.A., Fingelkurts A.A., Neves C.F.H.* Consciousness as a phenomenon in the operational architectonics of brain organization: Criticality and self-organization considerations: Emergent Critical Brain Dynamics // *Chaos, Solitons & Fractals*. – 2013. – Vol. 55. – P. 13–31.
26. *Friedman N.P., Miyake A.* Unity and diversity of executive functions: Individual differences as a window on cognitive structure: Is a «single» brain model sufficient? // *Cortex*. – 2017. – Vol. 86. – P. 186–204.
27. *Friedman N.P., Miyake A., Young S.E., DeFries J.C., Corley R.P., Hewitt J.K.* Individual differences in executive functions are almost entirely genetic in origin // *Journal of Experimental Psychology: General*. – 2008. – Vol. 137. – No. 2. – P. 201–225.
28. *Fries P.* Rhythms for cognition: Communication through coherence // *Neuron*. – 2015. – Vol. 88. – No. 1. – P. 220–235.
29. *Friese U., Daume J., Göschl F., König P., Wang P., Engel A.K.* Oscillatory brain activity during multisensory attention reflects activation, disinhibition, and cognitive control // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – Art. 32775. doi: 10.1038/srep32775.
30. *Fuster J.* *The Prefrontal Cortex*. – Academic Press, 2015. – 461 p.
31. *Goldman-Rakic P.S.* Architecture of the prefrontal cortex and the central executive // *Annals of the New York Academy of Sciences*. – 1995. – Vol. 769. – No. 1. – P. 71–84.
32. *Gordon S., Todder D., Deutsch I., Garbi D., Getter N., Meiran N.* Are resting state spectral power measures related to executive functions in healthy young adults? // *Neuropsychologia*. – 2018. – Vol. 108. – P. 61–72.
33. *Gratton G., Cooper P., Fabiani M., Carter C.S., Karayanidis F.* Dynamics of cognitive control: Theoretical bases, paradigms, and a view for the future // *Psychophysiology*. – 2018. – Vol. 55. – No. 3. – e13016. doi: 10.1111/psyp.13016.
34. *Heidlmayr K., Kihlstedt M., Isel F.* A review on the electroencephalography markers of Stroop executive control processes // *Brain and Cognition*. – 2020. – Vol. 146. – Art. 105637. doi: 10.1016/j.bandc.2020.105637.
35. *Hughes C.* Changes and challenges in 20 years of research into the development of executive functions // *Infant and Child Development*. – 2011. – Vol. 20. – No. 3. – P. 251–271.
36. *Irrmischer M., Poil S.-S., Mansvelder H.D., Intra F.S., Linkenkaer-Hansen K.* Strong long-range temporal correlations of beta/gamma oscillations are associated with poor sustained visual attention performance // *European Journal of Neuroscience*. – 2018. – Vol. 48. – No. 8. – P. 2674–2683.
37. *Jamadar S., Thienel R., Karayanidis F.* Task switching processes // *Brain Mapping: An Encyclopedic Reference*. – 2015. – Vol. 3. – P. 327–335.
38. *Jiang L., Qiao K., Sui D., Zhang Z., Dong H.-M.* Functional criticality in the human brain: Physiological, behavioral and neurodevelopmental correlates // *PloS One*. – 2019. – Vol. 14. – No. 3. – e0213690. doi: 10.1371/journal.pone.0213690.
39. *Kitzbichler M.G., Smith M.L., Christensen S.R., Bullmore E.* Broadband criticality of human brain network synchronization // *PLoS Computational Biology*. – 2009. – Vol. 5. – No. 3. – e1000314. doi: 10.1371/journal.pcbi.1004174.
40. *Kovacs K., Conway A.R.A.* Process overlap theory: A unified account of the general factor of intelligence // *Psychological Inquiry*. – 2016. – Vol. 27. – No. 3. – P. 151–177.
41. *Kovacs K., Conway A.R.A.* What is IQ? Life beyond «General Intelligence» // *Current Directions in Psychological Science*. – 2019. – Vol. 28. – No. 2. – P. 189–194.
42. *Krönke K.-M., Wolff M., Shi Y., Kräplin A., Smolka M.N., Bühringer G., Goschke T.* Functional connectivity in a triple-network saliency model is associated with real-life self-control // *Neuropsychologia*. – 2020. – Vol. 149. – Art. 107667. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2020.107667.

43. Lee H., Golkowski D., Jordan D., Berger S., Ilg R., Lee J., Mashour G.A., Lee U., Avidan M.S., Blain-Moraes S., Golmirzaie G., Hardie R., Hogg R., Janke E., Kelz M.B., Maier K., Mashour G.A., Maybrier H., McKinstry-Wu A., Muench M., Ochroch A., Palanca B.J.A., Picton P., Schwarz E.M., Tarnal V., Vanini G., Vlisides P.E. Relationship of critical dynamics, functional connectivity, and states of consciousness in large-scale human brain networks // *NeuroImage*. – 2019. – Vol. 188. – P. 228–238.
44. Lemire-Rodger S., Lam J., Viviano J.D., Stevens W.D., Spreng R.N., Turner G.R. Inhibit, switch, and update: A within-subject fMRI investigation of executive control // *Neuropsychologia*. – 2019. – Vol. 132. – Art. 107134. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2019.107134.
45. Mahjoory K., Cesnaite E., Hohlefeld F.U., Villringer A., Nikulin V.V. Power and temporal dynamics of alpha oscillations at rest differentiate cognitive performance involving sustained and phasic cognitive control // *NeuroImage*. – 2019. – Vol. 188. – P. 135–144.
46. Massobrio P., Pasquale V. Complexity of Network Connectivity Promotes Self-organized Criticality in Cortical Ensembles // *The Functional Role of Critical Dynamics in Neural Systems / Springer Series on Bio- and Neurosystems*. Eds. N. Tomen, J.M. Herrmann, U. Ernst. – Cham: Springer International Publishing, 2019. – P. 47–68.
47. Menon V., D'Esposito M. The role of PFC networks in cognitive control and executive function // *Neuropsychopharmacology: official publication of the American College of Neuropsychopharmacology*. – 2021. doi: 10.1038/s41386-021-01152-w.
48. Niendam T.A., Laird A.R., Ray K.L., Dean Y.M., Glahn D.C., Carter C.S. Meta-analytic evidence for a superordinate cognitive control network subserving diverse executive functions // *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*. – 2012. – Vol. 12. – No. 2. – P. 241–268.
49. Nigg J.T. Annual Research Review: On the relations among self-regulation, self-control, executive functioning, effortful control, cognitive control, impulsivity, risk-taking, and inhibition for developmental psychopathology // *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and allied disciplines*. – 2017. – Vol. 58. – No. 4. – P. 361–383.
50. Nikulin V.V., Brismar T. Long-range temporal correlations in electroencephalographic oscillations: Relation to topography, frequency band, age and gender // *Neuroscience*. – 2005. – Vol. 130. – No. 2. – P. 549–558.
51. Palva S., Palva J.M. New vistas for α -frequency band oscillations // *Trends in Neurosciences*. – 2007. – Vol. 30. – No. 4. – P. 150–158.
52. Palva S., Palva J.M. Functional roles of alpha-band phase synchronization in local and large-scale cortical networks // *Frontiers in Psychology*. – 2011. – Vol. 2. – P. 204. doi: 10.3389/fpsyg.2011.00204.
53. Plomin R., Kovas Y. Generalist genes and learning disabilities // *Psychological Bulletin*. – 2005. – Vol. 131. – No. 4. – P. 592–617.
54. Poil S.-S., Hardstone R., Mansvelder H.D., Linkenkaer-Hansen K. Critical-state dynamics of avalanches and oscillations jointly emerge from balanced excitation/inhibition in neuronal networks // *Journal of Neuroscience*. – 2012. – Vol. 32. – No. 29. – P. 9817–9823.
55. Rubinov M., Sporns O., Thivierge J.-P., Breakspear M. Neurobiologically realistic determinants of self-organized criticality in networks of spiking neurons // *PLoS Computational Biology*. – 2011. – Vol. 7. – No. 6. – e1002038. doi: 10.1371/journal.pcbi.1002038.
56. Sadaghiani S., D'Esposito M. Functional characterization of the cingulo-opercular network in the maintenance of tonic alertness // *Cerebral Cortex*. – 2015. – Vol. 25. – No. 9. – P. 2763–2773.
57. Sadaghiani S., Kleinschmidt A. Brain networks and α -oscillations: Structural and functional foundations of cognitive control // *Trends in Cognitive Sciences*. – 2016. – Vol. 20. – No. 11. – P. 805–817.
58. Shin C.-W., Kim S. Self-organized criticality and scale-free properties in emergent functional neural networks // *Phys. Rev. E Stat. Nonlin. Soft Matter Phys.* – 2006. – Vol. 74. – No. 4. – Pt. 2. – Art. 045101. doi: 10.1103/PhysRevE.74.045101.
59. Shine J.M., Poldrack R.A. Principles of dynamic network reconfiguration across diverse brain states: Brain Connectivity Dynamics // *NeuroImage*. – 2018. – Vol. 180. – P. 396–405.
60. Shirer W.R., Ryali S., Rykhlevskaia E., Menon V., Greicius M.D. Decoding subject-driven cognitive states with whole-brain connectivity patterns // *Cerebral Cortex*. – 2012. – Vol. 22. – No. 1. – P. 158–165.
61. Song B., Ma N., Liu G., Zhang H., Yu L., Liu L., Zhang J. Maximal flexibility in dynamic

- functional connectivity with critical dynamics revealed by fMRI data analysis and brain network modelling // *Journal of Neural Engineering*. – 2019. – Vol. 16(5). – Art. 056002. doi: 10.1088/1741-2552/ab20bc.
62. Spitzer B., Haegens S. Beyond the status quo: A role for beta oscillations in endogenous content (re)activation // *eNeuro*. – 2017 Aug. – Vol. 4(4): ENEURO.0170-17.2017. doi: 10.1523/ENEURO.0170-17.2017.
 63. Sridharan D., Levitin D.J., Menon V. A critical role for the right fronto-insular cortex in switching between central-executive and default-mode networks // *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*. – 2008. – Vol. 105. – No. 34. – P. 12569–12574.
 64. Stuss D.T., Benson D.F. The Frontal Lobes and Control of Cognition and Memory / *The Frontal Lobes Revisited*. – Psychology Press, 1987.
 65. Van Diepen R.M., Foxe J.J., Mazaheri A. The functional role of alpha-band activity in attentional processing: the current zeitgeist and future outlook: Attention & perception // *Current Opinion in Psychology*. – 2019. – Vol. 29. – P. 229–238.
 66. Wallis G., Stokes M., Cousijn H., Woolrich M., Nobre A.C. Frontoparietal and cingulo-opercular networks play dissociable roles in control of working memory // *Journal of Cognitive Neuroscience*. – 2015. – Vol. 27. – No. 10. – P. 2019–2034.
 67. Wu T., Wang X., Wu Q., Spagna A., Yang J., Yuan C., Wu Y., Gao Z., Hof P.R., Fan J. Anterior insular cortex is a bottleneck of cognitive control // *NeuroImage*. – 2019. – Vol. 195. – P. 490–504.
 68. Zink N., Lenartowicz A., Markett S. A new era for executive function research: On the transition from centralized to distributed executive functioning // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. – 2021. – Vol. 124. – P. 235–244.
 3. Ambrosini E, Vallesi A. Asymmetry in prefrontal resting-state EEG spectral power underlies individual differences in phasic and sustained cognitive control. *NeuroImage* 2016; 124(Pt. A):843–857.
 4. Arviv O, Goldstein A, Shriki O. Near-critical dynamics in stimulus-evoked activity of the human brain and its relation to spontaneous resting-state activity. *Journal of Neuroscience* 2015; 35(41):13927–13942.
 5. Atasoy S, Deco G, Kringelbach ML. Playing at the Edge of Criticality: Expanded Whole-Brain Repertoire of Connectome-Harmonics. In: Tomen N, Herrmann J, Ernst U (eds). *The Functional Role of Critical Dynamics in Neural Systems*. Springer Series on Bio- and Neurosystems. Springer, Cham 2019; 11:27–45. doi: 10.1007/978-3-030-20965-0_2.
 6. Avena-Koenigsberger A, Misic B, Sporns O. Communication dynamics in complex brain networks. *Nature Reviews Neuroscience* 2018; 19(1):17–33.
 7. Baldassarre A, Lewis CM, Comitteri G, Snyder AZ, Romani GL, Corbetta M. Individual variability in functional connectivity predicts performance of a perceptual task. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA* 2012; 109(9):3516–3521.
 8. Bertolero MA, Yeo BTT, D’Esposito M. The modular and integrative functional architecture of the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2015; 112(49):E6798–E6807.
 9. Botvinick M, Braver T. Motivation and cognitive control: From behavior to neural mechanism. *Annual Review of Psychology* 2015; 66(1):83–113.
 10. Botvinick MM, Cohen JD. The computational and neural basis of cognitive control: Charted territory and new frontiers. *Cognitive Science* 2014; 38(6):1249–1285.
 11. Braver TS, Kizhner A, Tang R, Freund MC, Etzel JA. The dual mechanisms of cognitive control project. *Journal of Cognitive Neuroscience* 2021; 33(9):1990–2015.
 12. Cai W, Chen T, Ryali S, Kochalka J, Li C-SR, Menon V. Causal interactions within a frontal-cingulate-parietal network during cognitive control: Convergent evidence from a multisite-multitask investigation. *Cerebral Cortex* 2016; 26(5):2140–2153.

References

1. Alba G, Vila J, Rey B, Montoya P, Muñoz MÁ. The relationship between heart rate variability and electroencephalography functional connectivity variability is associated with cognitive flexibility. *Frontiers in Human Neuroscience* 2019; 13: 64. doi: 10.3389/fnhum.2019.00064.
2. Ambrosini E, Arbula S, Rossato C, Pacella V, Vallesi A. Neuro-cognitive architecture of executive functions: A latent variable analysis. *Cortex* 2019; 119:441–456.

13. Carter CS, Krug MK. Dynamic Cognitive Control and Frontal-Cingulate Interactions. *Cognitive Neuroscience of Attention*, 2nd ed. New York, NY, US: Guilford Press, 2012:89–98.
14. Cavanagh JF, Frank MJ. Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences* 2014; 18(8):414–421.
15. Cocchi L, Gollo LL, Zalesky A, Breakspear M. Criticality in the brain: A synthesis of neurobiology, models and cognition. *Progress in Neurobiology* 2017; 158:132–152.
16. Cocchi L, Zalesky A, Fornito A, Mattingley JB. Dynamic cooperation and competition between brain systems during cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences* 2013; 17(10):493–501.
17. Cooper PS, Darriba Á, Karayanidis F, Barceló F. Contextually sensitive power changes across multiple frequency bands underpin cognitive control. *NeuroImage* 2016; 132:499–511.
18. Corbetta M, Shulman GL. Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience* 2002; 3(3):201–215.
19. Vries IEJ de, Slagter HA, Olivers CNL. Oscillatory control over representational states in working memory. *Trends in Cognitive Sciences* 2020; 24(2):150–162.
20. Deary IJ, Cox SR, Hill WD. Genetic variation, brain, and intelligence differences. *Molecular Psychiatry*, 2021. doi: 10.1038/s41380-021-01027-y. Online ahead of print.
21. Deco G, Jirsa VK. Ongoing cortical activity at rest: Criticality, multistability, and ghost attractors. *Journal of Neuroscience* 2012; 32(10):3366–3375.
22. Douw L, Wakeman DG, Tanaka N, Liu H, Stufflebeam SM. State-dependent variability of dynamic functional connectivity between frontoparietal and default networks relates to cognitive flexibility. *Neuroscience* 2016; 339:12–21.
23. Elton A, Gao W. Task-related modulation of functional connectivity variability and its behavioral correlations. *Human Brain Mapping* 2015; 36(8):3260–3272.
24. Engle RW. Working memory and executive attention: A revisit. *Perspectives on Psychological Science* 2018; 13(2):190–193.
25. Fingelkurts AA, Fingelkurts AA, Neves CFH. Consciousness as a phenomenon in the operational architectonics of brain organization: Criticality and self-organization considerations: Emergent Critical Brain Dynamics. *Chaos, Solitons & Fractals* 2013; 55:13–31.
26. Friedman NP, Miyake A. Unity and diversity of executive functions: Individual differences as a window on cognitive structure: Is a «single» brain model sufficient? *Cortex* 2017; 86:186–204.
27. Friedman NP, Miyake A, Young SE, DeFries JC, Corley RP, Hewitt JK. Individual differences in executive functions are almost entirely genetic in origin. *Journal of Experimental Psychology: General* 2008; 137(2):201–225.
28. Fries P. Rhythms for cognition: Communication through coherence. *Neuron* 2015; 88(1):220–235.
29. Fries U, Daume J, Göschl F, König P, Wang P, Engel AK. Oscillatory brain activity during multisensory attention reflects activation, disinhibition, and cognitive control. *Scientific Reports* 2016; 6: 32775. doi: 10.1038/srep32775.
30. Fuster J. *The Prefrontal Cortex*. Academic Press, 2015: 461.
31. Goldman-Rakic PS. Architecture of the prefrontal cortex and the central executive. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1995; 769(1):71–84.
32. Gordon S, Todder D, Deutsch I, Garbi D, Getter N, Meiran N. Are resting state spectral power measures related to executive functions in healthy young adults? *Neuropsychologia* 2018; 108:61–72.
33. Gratton G, Cooper P, Fabiani M, Carter CS, Karayanidis F. Dynamics of cognitive control: Theoretical bases, paradigms, and a view for the future. *Psychophysiology* 2018; 55(3):e13016. doi: 10.1111/psyp.13016.
34. Heidlmayr K, Kihlstedt M, Isel F. A review on the electroencephalography markers of Stroop executive control processes. *Brain and Cognition* 2020; 146:105637. doi: 10.1016/j.bandc.2020.105637.
35. Hughes C. Changes and challenges in 20 years of research into the development of executive functions. *Infant and Child Development* 2011; 20(3):251–271.
36. Irrmischer M, Poil S-S, Mansvelde HD, Intra FS, Linkenkaer-Hansen K. Strong long-range temporal correlations of beta/gamma oscillations are associated with poor sustained visual attention performance. *European Journal of Neuroscience* 2018; 48(8):2674–2683.
37. Jamadar S, Thienel R, Karayanidis F. Task switching processes. *Brain Mapping: An Encyclopedic Reference* 2015; 3:327–335.
38. Jiang L, Qiao K, Sui D, Zhang Z, Dong H-M. Functional criticality in the human brain: Phys-

- iological, behavioral and neurodevelopmental correlates. *PloS One* 2019; 14(3):e0213690. doi: 10.1371/journal.pone.0213690.
39. Kitzbichler MG, Smith ML, Christensen SR, Bullmore E. Broadband criticality of human brain network synchronization. *PLoS Computational Biology* 2009; 5(3):e1000314. doi: 10.1371/journal.pcbi.1004174.
 40. Kovacs K, Conway ARA. Process overlap theory: A unified account of the general factor of intelligence. *Psychological Inquiry* 2016; 27(3):151–177.
 41. Kovacs K, Conway ARA. What is IQ? Life beyond «General Intelligence». *Current Directions in Psychological Science* 2019; 28(2):189–194.
 42. Krönke K-M, Wolff M, Shi Y, Kräplin A, Smolka MN, Bühringer G, Goschke T. Functional connectivity in a triple-network saliency model is associated with real-life self-control. *Neuropsychologia* 2020; 149:107667. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2020.107667.
 43. Lee H, Golkowski D, Jordan D, Berger S, Ilg R, Lee J, Mashour GA, Lee U, Avidan MS, Blain-Moraes S, Golmirzaie G, Hardie R, Hogg R, Janke E, Kelz MB, Maier K, Mashour GA, Maybrier H, McKinstry-Wu A, Muench M, Ochroch A, Palanca BJA, Picton P, Schwarz EM, Tarnal V, Vanini G, Vlisides PE. Relationship of critical dynamics, functional connectivity, and states of consciousness in large-scale human brain networks. *NeuroImage* 2019; 188:228–238.
 44. Lemire-Rodger S, Lam J, Viviano JD, Stevens WD, Spreng RN, Turner GR. Inhibit, switch, and update: A within-subject fMRI investigation of executive control. *Neuropsychologia* 2019; 132:107134. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2019.107134.
 45. Mahjoory K, Cesnaite E, Hohlefeld FU, Villringer A, Nikulin VV. Power and temporal dynamics of alpha oscillations at rest differentiate cognitive performance involving sustained and phasic cognitive control. *NeuroImage* 2019; 188:135–144.
 46. Massobrio P, Pasquale V. Complexity of Network Connectivity Promotes Self-organized Criticality in Cortical Ensembles. *The Functional Role of Critical Dynamics in Neural Systems*. Springer Series on Bio- and Neurosystems. Eds. N. Tomen, J.M. Herrmann, U. Ernst. Cham: Springer International Publishing, 2019:47–68.
 47. Menon V, D’Esposito M. The role of PFC networks in cognitive control and executive function. *Neuropsychopharmacology: official publication of the American College of Neuropsychopharmacology* 2021; doi: 10.1038/s41386-021-01152-w.
 48. Niendam TA, Laird AR, Ray KL, Dean YM, Glahn DC, Carter CS. Meta-analytic evidence for a superordinate cognitive control network subserving diverse executive functions. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience* 2012; 12(2):241–268.
 49. Nigg JT. Annual Research Review: On the relations among self-regulation, self-control, executive functioning, effortful control, cognitive control, impulsivity, risk-taking, and inhibition for developmental psychopathology. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and allied disciplines* 2017; 58(4):361–383.
 50. Nikulin VV, Brismar T. Long-range temporal correlations in electroencephalographic oscillations: Relation to topography, frequency band, age and gender. *Neuroscience* 2005; 130(2):549–558.
 51. Palva S, Palva JM. New vistas for α -frequency band oscillations. *Trends in Neurosciences* 2007; 30(4):150–158.
 52. Palva S, Palva JM. Functional roles of alpha-band phase synchronization in local and large-scale cortical networks. *Frontiers in Psychology* 2011; 2:204. doi: 10.3389/fpsyg.2011.00204.
 53. Plomin R, Kovas Y. Generalist genes and learning disabilities. *Psychological Bulletin* 2005; 131(4):592–617.
 54. Poil S-S, Hardstone R, Mansvelder HD, Linkenkaer-Hansen K. Critical-state dynamics of avalanches and oscillations jointly emerge from balanced excitation/inhibition in neuronal networks. *Journal of Neuroscience* 2012; 32(29):9817–9823.
 55. Rubinov M, Sporns O, Thivierge J-P, Breakspear M. Neurobiologically realistic determinants of self-organized criticality in networks of spiking neurons. *PLoS Computational Biology* 2011; 7(6):e1002038. doi: 10.1371/journal.pcbi.1002038.
 56. Sadaghiani S, D’Esposito M. Functional characterization of the cingulo-opercular network in the maintenance of tonic alertness. *Cerebral Cortex* 2015; 25(9):2763–2773.
 57. Sadaghiani S, Kleinschmidt A. Brain networks and α -oscillations: Structural and function-

- al foundations of cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences* 2016; 20(11):805–817.
58. Shin C-W, Kim S. Self-organized criticality and scale-free properties in emergent functional neural networks. *Phys. Rev. E Stat. Nonlin. Soft Matter Phys* 2006; 74(4. Pt. 2):045101. doi: 10.1103/PhysRevE.74.045101.
59. Shine JM, Poldrack RA. Principles of dynamic network reconfiguration across diverse brain states: Brain Connectivity Dynamics. *NeuroImage* 2018; 180:396–405.
60. Shirer WR, Ryali S, Rykhlevskaia E, Menon V, Greicius MD. Decoding subject-driven cognitive states with whole-brain connectivity patterns. *Cerebral Cortex* 2012; 22(1):158–165.
61. Song B, Ma N, Liu G, Zhang H, Yu L, Liu L, Zhang J. Maximal flexibility in dynamic functional connectivity with critical dynamics revealed by fMRI data analysis and brain network modelling. *Journal of Neural Engineering* 2019; 16(5):056002. doi: 10.1088/1741-2552/ab20bc.
62. Spitzer B, Haegens S. Beyond the status quo: A role for beta oscillations in endogenous content (re)activation. *eNeuro* 2017; 4(4):ENEURO.0170-17.2017. doi: 10.1523/ENEURO.0170-17.2017.
63. Sridharan D, Levitin DJ, Menon V. A critical role for the right fronto-insular cortex in switching between central-executive and default-mode networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA* 2008; 105(34):12569–12574.
64. Stuss DT, Benson DF. *The Frontal Lobes and Control of Cognition and Memory. The Frontal Lobes Revisited.* Psychology Press, 1987.
65. Van Diepen RM, Foxe JJ, Mazaheri A. The functional role of alpha-band activity in attentional processing: the current zeitgeist and future outlook: Attention & perception. *Current Opinion in Psychology* 2019; 29:229–238.
66. Wallis G, Stokes M, Cousijn H, Woolrich M, Nobre AC. Frontoparietal and cingulo-opercular networks play dissociable roles in control of working memory. *Journal of Cognitive Neuroscience* 2015; 27(10):2019–2034.
67. Wu T, Wang X, Wu Q, Spagna A, Yang J, Yuan C, Wu Y, Gao Z, Hof PR, Fan J. Anterior insular cortex is a bottleneck of cognitive control. *NeuroImage* 2019; 195:490–504.
68. Zink N, Lenartowicz A, Markett S. A new era for executive function research: On the transition from centralized to distributed executive functioning. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 2021; 124:235–244.

THE ROLE OF OSCILLATORY BRAIN ACTIVITY IN COGNITIVE CONTROL OF ATTENTION

A.O. TABUEVA

Psychological Institute of Russian Academy of Education, Moscow

The article presents information on the psychophysiological mechanisms of the functioning of cognitive control of attention. It is shown that, in addition to the features of the structural organization, control of attention is heavily supported by the properties of the spatio-temporal dynamics of the functional connections of the brain. The role of dynamic functional connectivity and its variability over time as a source of individual differences in cognitive control is emphasized.

Keywords: cognitive control, executive functions, oscillatory activity, functional connectivity

Address:

Tabueva A.O.,
junior research fellow,
Psychological Institute of Russian Academy of Education,
E-mail: anntabueva@gmail.com