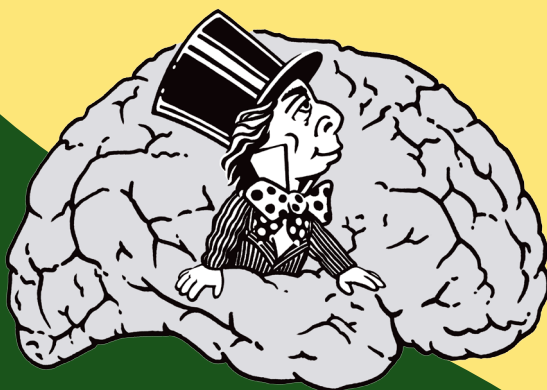


КОГНИТИВНАЯ НАУКА

В МОСКВЕ



НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

МАТЕРИАЛЫ
КОНФЕРЕНЦИИ
2023

Под ред. Е.В. Печенковой, М.В. Фаликман, А.Я. Койфман

УДК 159.9
ББК 88.25
К57

Когнитивная наука в Москве: новые исследования. Материалы конференции 21 – 22 июня 2023 г. Под ред. Е.В. Печенковой, М.В. Фаликман, А.Я. Койфман. – М.: ООО «Буки Веди», Московский институт психоанализа. 2023 г. – 604 стр.

© Авторы статей, 2023

ISBN 978-5-4465-3880-5

УДК 159.9
ББК 88.25

ISBN 978-5-4465-3880-5

© Авторы статей, 2023

СЕТЕВАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ПРОЦЕССА ЛОГИЧЕСКОГО УМОЗАКЛЮЧЕНИЯ

А. А. Кисельников*, А. И. Ковалёв, Д. В. Зайцев, К. Г. Поворова,
В. Д. Абросимова, В. М. Зубко
kiselnikov@mail.ru

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва

Аннотация. В современной психофизиологии остается недостаточно изученным такой важный аспект психофизиологических механизмов вербально-логического мышления, как их сетевая организация. Психофизиологическая методика включала в себя одновременную регистрацию движений глаз и ЭЭГ и состояла из контрольной и экспериментальной серий, в исследовании приняли участие 51 человек. Обработка и анализ данных по сетевой организации психофизиологических механизмов логического умозаключения происходили на трех системных уровнях: общемозговом, промежуточном и локальном. Выявленная нами связь эффективности логических умозаключений с организацией функциональной архитектуры мозга по принципу «тесного мира» говорит об оптимальном балансе процессов глобальной информационной интеграции и сегрегации как механизме вербально-логического мышления. Из полученных данных об увеличении связности левополушарных лобных хабов системы P-FIT с внешними зрительно-пространственными модулями можно предположить, что чем лучше развито формально-логическое мышление, тем активнее левополушарный лобный хаб P-FIT подгружает зрительные механизмы, в том числе механизмы распознавания слов во время чтения. Кроме того, полученные нами результаты анализа глазодвигательной активности позволяют количественно описать специфику каждого вида умозаключений и когнитивных механизмов, стоящих за ними.

Ключевые слова: когнитивная нейронаука, сетевая нейронаука, электроэнцефалография, айтрекинг, когнитивные процедуры, умозаключения, логика.

Введение

Изучение механизмов вербально-логического мышления является актуальной на данный момент задачей, особенно в контексте активно идущего сейчас развития больших языковых моделей как части искусственного интеллекта. Среди всех процессов вербального мышления особенно важным является процесс умозаключения, который составляет основу логического мышления. Однако в психофизиологических исследованиях еще недостаточно изучен такой важный аспект психофизиологических механизмов вербального мышления, как их сетевая организация (Medaglia et al., 2009; Zhang et al., 2015).

Кроме того, в различных когнитивных исследованиях на данный момент уделяется мало внимания совместному использованию метода айтрекинга и ЭЭГ.

Целью данного исследования являлось изучение психофизиологических механизмов логических умозаключений в контексте сетевого подхода при помощи методов айтрекинга и ЭЭГ.

Задачи исследования: изучить связь сетевой организации психофизиологических механизмов логического умозаключения с успешностью решения логических задач на трех системных уровнях: общемозговом, промежуточном и локальном; изучить связь глазодвигательных параметров различных видов умозаключений с успешностью решения логических задач.

Методика

Для проведения эксперимента была создана установка, позволяющая одновременно регистрировать активность головного мозга и движения глаз. ЭЭГ записывалась при помощи 19-канальной установки «Нейро-КМ» и программной среды BrainWin. Запись производилась в диапазоне 0.3 – 45 Гц с частотой дискретизации 1000 Гц. Регистрация движений глаз производилась бинокулярно посредством айтрекера SMI RED с частотой 120 Гц и точностью <0.1 углового градуса. Предъявление стимуляции осуществлялось с помощью программы SMI Experiment Center 3.6.

Психофизиологическая методика включала в себя одновременную регистрацию движений глаз и ЭЭГ и состояла из двух серий. Перед началом первой серии производилась фоновая запись ЭЭГ с открытыми и закрытыми глазами длительностью три минуты каждая. Первая серия эксперимента являлась контрольной. На экране предъявлялся короткий текст. Участнику было необходимо его прочитать и далее ответить на вопрос к этому тексту. Всего в первой серии участнику предъявлялись 40 стимулов в рандомизированном порядке. Во второй серии эксперимента на экране предъявлялся текст, содержащий две посылки и четыре варианта заключения, правильным среди которых с точки зрения формальной логики был только один. Всего каждому участнику предъявлялось 80 стимулов (четыре вида умозаключений с правильным(р)/неправильным(н) вариантом и/или строгой(s)/нестрогой дизъюнкцией в каждом: Modus Ponens (MP_p и MP_n), Modus Tollens (MT_p и MT_n), Modus Tollendo Ponens (MTP_p и MTP_sp) и Modus Ponendo Tollens (MPT_n и MPT_sp)) в рандомизированном порядке. Для выравнивания семантической составляющей в двух сериях тексты совпадали по тематике. В контрольной серии тексты не содержали логических высказываний. Время выполнения обеих серий было неограниченным.

Также участники проходили тест «Прогрессивные матрицы Равена ПЛЮС» (Равен и др., 2001), состоящий из 60 заданий, время ответа на вопрос было неограниченным.

Выборка

В исследовании приняли участие 51 человек (26 мужчин, 25 женщин) с нормальным или скорректированным до нормального зрением в возрасте от 18 до 35 лет.

Обработка данных

Обработка данных регистрации движений глаз осуществлялась с помощью программы BeGaze 2.0. Предобработка ЭЭГ-файлов происходила с использованием программы Brainstorm. Частотная фильтрация 4–45 Гц и удаление артефактов методом независимых компонент (ICA) были произведены при помощи скрипта на языке Python 3 с использованием библиотеки MNE (Gramfort, 2013).

Подсчет матриц связности и различных сетевых метрик производился при помощи библиотек *pandas*, *igraph*, *community*, *bctpy* и *networkx*¹. Для расчета индекса синхронизации wPLI (weighted Phase Lag Index) происходило разбиение на двухсекундные эпохи в шести частотных диапазонах (4–8, 8–13, 13–30, 30–45, 4–30, 4–45 Гц). Расчет связности производился между 68 корковыми источниками, восстановленными при помощи метода sLORETA и атласа коры головного мозга Desikan-Killiany с помощью стандартных возможностей пакета *mne*, позволяющих сделать соответствующую реконструкцию по 19-канальной ЭЭГ (Desikan et al., 2006).

Обработка и анализ данных по сетевой организации психофизиологических механизмов логического умозаключения происходили на трех системных уровнях: общемозговом, промежуточном и локальном. На общемозговом уровне происходил подсчет следующих метрик: средняя сила (Strength), характеристическая длина пути (CharPathLength), коэффициент кластеризации (ClustCoef), нормированный на случайные графы коэффициент кластеризации (NormalCC), нормированная характеристическая длина пути (NormalCPL), индекс тесного мира (SWI) и индекс модулярности (Modularity). Для следующих двух уровней были выделены левополушарные ROI (области интереса) (так как объектом исследования являлось именно вербально-логическое мышление), входящие в лобный и теменной хабы и соответствующую P-FIT — концепции лобно-теменной интеграции как механизма интеллекта (Jung, Haier, 2007). Для выявления специфически связанных с логическими процессами мозговых механизмов параметры мозговой связности обоих уровней, полученные во время контрольной серии, вычитались из таковых в экспериментальной. На промежуточном уровне вычислялась корреляция полученной разницы с успешностью решения логических задач по следующим сетевым параметрам для каждой ROI: нормированная общая сила связности конкретного узла с другими (“str_all”), локальная эффективность (“local_eff”), степень посредничества (“betweenness”) и степень влиятельности (“eigenvector”). На локальном уровне вычислялась корреляция успешности решения логических задач и изменения связности ROI с внешними для P-FIT мозговыми областями (в рамках нашего предположения о «подгрузке» внешних модулей лобно-теменной системой как механизма, частично обеспечивающего эффективность логического умозаключения). Для сопоставления различных параметров использовался коэффициент корреляции Спирмена и критерий Уилкоксона.

¹ Благодарим за помощь в обработке данных Митюреву Дину Григорьевну и Комарову Алису Валерьевну.

Результаты

Корреляция между оценкой уровня общего интеллекта по тесту Равена и успешностью выполнения заданий на логику составила $R = .51$ ($p = .00012$).

Было выявлено, что общемозговые сетевые метрики SWI и NormalCC, подсчитанные в общем диапазоне 4–45 Гц на фоновой записи с открытыми глазами, положительно коррелируют с успешностью решения логических задач: $R = .4855$ и $R = .4856$ соответственно ($p_{\text{corr}} = .025$, поправка Бонферрони).

После анализа на глобальном уровне был произведен анализ более частных тенденций на промежуточном и локальном уровнях. Этот анализ был проведен без поправки на множественные сравнения в связи с тесной коррелированностью изучаемых параметров (зон интереса как хабов единой системы Р-FIT, сетевых метрик), а также во избежание ошибки второго рода.

Анализ мозговой связности на промежуточном уровне показал, что в альфа-диапазоне 8–13 Гц изменения параметров связности отдельных корковых структур с остальными в экспериментальной серии по сравнению с контрольной коррелируют с успешностью решения логических задач: *лобный полюс* – “str_all” $R = .38$ ($p = .006$), “local_eff” $R = .42$ ($p = .002$); *орбитальная часть нижней лобной извилины* – “str_all” $R = .28$ ($p = .05$), “local_eff” $R = .33$ ($p = .02$); *ростральная часть средней лобной извилины* – “local_eff” $R = .33$ ($p = .02$).

В бета-диапазоне 13–30 Гц для каудальной части средней лобной извилины корреляция изменения параметра betweenness с успешностью решения составила $R = .36$ ($p = 0.01$).

Анализ локального уровня обнаружил положительные корреляции размера увеличения мозговой связности от контрольной серии к экспериментальной в общем диапазоне 4–45 Гц с успешностью решения логических задач для следующих левополушарных ROI: *орбитальная часть нижней лобной извилины* с клиной $R = .28$ ($p = .05$) и латеральной затылочной корой $R = .32$ ($p = .02$); *ростральная часть средней лобной извилины* с энторинальной корой $R = .30$ ($p = .03$), веретенообразной извилиной $R = .33$ ($p = .02$), язычковой извилиной $R = .28$ ($p = .05$) и средней височной извилиной $R = .33$ ($p = .02$).

Кроме того, были выявлены следующие значимые после поправки Бонферрони ($p_{\text{corr}} < .03$) связи глазодвигательных параметров при выполнении различных видов умозаключений с успешностью решения логических задач:

1. Время решения коррелирует с правильностью решения логических задач для MP_p ($R = -.15$), MT_p ($R = -.26$), MP_n ($R = .37$) и MT_n ($R = .37$).
2. Количество саккад и фиксаций, длина глазодвигательной траектории коррелируют с правильностью решения логических задач для MT_p ($R = -.25$, $R = -.25$, $R = -.25$), MP_n ($R = .36$, $R = .36$, $R = .32$) и MT_n ($R = .36$, $R = .36$, $R = .33$).
3. Частота фиксаций и частота саккад коррелируют с правильностью решения для MP_n ($R = -.20$, $R = -.17$) и MT_n ($R = -.21$, $R = -.18$).
4. Средняя длительность фиксаций коррелирует с верностью решения для MP_n ($R = .18$) и MT_n ($R = .22$).

Обсуждение и выводы

Полученная корреляция между оценкой общего интеллекта по тесту Равена и успешностью решения заданий на логические умозаключения подтверждает адекватность предложенной нами экспериментальной схемы определения уровня логического мышления.

Выявленная нами связь эффективности логических умозаключений с глобальной организацией функциональной архитектуры мозга по принципу «тесного мира» говорит об оптимальном балансе процессов глобальной информационной интеграции и сегрегации как механизме вербально-логического мышления.

Из полученных на локальном уровне тенденций к увеличению связности левополушарных лобных хабов системы P-FIT с внешними зрительно-пространственными модулями можно предположить, что чем лучше развито формально-логическое мышление, тем активнее левополушарный лобный хаб P-FIT подгружает зрительные механизмы, в том числе механизмы распознавания слов во время чтения (Acheson, Hagoort, 2013). Также чем больше эффективность логического умозаключения, тем больше на промежуточном уровне указанные лобные хабы начинают быть связанными со всем остальным мозгом в целом и с ближайшими структурами в частности.

Полученные нами результаты анализа глазодвигательной активности позволяют количественно описать специфику каждого вида умозаключений и когнитивных механизмов, стоящих за ними.

Литература

Равен Д.К., Стайл И., Равен М. Стандартные плюс прогрессивные матрицы Равена (серии А, В, С, D, E). М.: Когито-Центр, 2001.

Acheson D.J., Hagoort P. Stimulating the brain's language network: Syntactic ambiguity resolution after TMS to the inferior frontal gyrus and middle temporal gyrus // *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2013. Vol. 25. No. 10. P. 1664–1677. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00430

Desikan R.S., Ségonne F., Fischl B., Quinn B.T., Dickerson B.C., Blacker D., Buckner R.L., Dale A.M., Maguire R.P., Hyman B.T., Albert M.S., Killiany R.J. An automated labeling system for subdividing the human cerebral cortex on MRI scans into gyral based regions of interest // *NeuroImage*. 2006. Vol. 31. No. 3. P. 968–980. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.01.021>

Gramfort A. MEG and EEG data analysis with MNE-Python // *Frontiers in Neuroscience*. 2013. Vol. 7. P. 267. <https://doi.org/10.3389/fnins.2013.00267>

Jung R.E., Haier R.J. The Parieto-Frontal Integration Theory (P-FIT) of intelligence: Converging neuroimaging evidence // *Behavioral and Brain Sciences*. 2007. Vol. 30. No. 2. P. 135–154. <https://doi.org/10.1017/s0140525x07001185>

Medaglia M.T., Tecchio F., Seri S., Lorenzo G.D., Rossini P.M., Porcaro C. Contradiction in universal and particular reasoning // *Human Brain Mapping*. 2009. Vol. 30. No. 12. P. 4187–4197. <https://doi.org/10.1002/hbm.20838>

Zhang L., Gan J.Q., Wang H. Mathematically gifted adolescents mobilize enhanced workspace configuration of theta cortical network during deductive reasoning // *Neuroscience*. 2015. Vol. 289. P. 334–348. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2014.12.072>

NETWORK ORGANIZATION OF THE PSYCHOPHYSIOLOGICAL MECHANISMS OF LOGICAL INFERENCE

A.A. Kiselnikov*, A.I. Kovalev, D.V. Zaitsev, K.G. Povorova, V.D. Abrosimova, V.M. Zubko

kiselnikov@mail.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow

Abstract. The network organization of verbal-logical thinking mechanisms remains an insufficiently studied but important topic in psychophysiology. In this study, 51 individuals participated in control and experimental series with the simultaneous registration of eye movements and EEG as the psychophysiological methodology. Data processing and analysis of the network organization of the psychophysiological mechanisms of logical reasoning occurred at three systemic levels: global brain, intermediate, and local. Our findings revealed a connection between the efficiency of logical reasoning and the functional architecture of the brain based on the “small world” principle, indicating an optimal balance between global information integration and segregation as a mechanism of verbal-logical thinking. Based on the observed increase in connectivity of left hemisphere frontal hubs of the P-FIT system with external visual-spatial modules, we can assume that the better developed the formal-logical thinking is, the more active the left hemisphere frontal hub P-FIT loads visual mechanisms, including word recognition mechanisms during reading. In addition, our eye movement results allow for a quantitative description of the specificity of each type of reasoning and the cognitive mechanisms behind them.

Keywords: cognitive neuroscience, network neuroscience, electroencephalography, eye tracking, cognitive procedures, reasoning, logic