

Вызванная кортикальная электрическая активность, связанная с предъявлением готового решения задачи на отдаленные ассоциации

Горностаев И.С.¹, Курганский А.В.^{1,2}, Вязовкина В.К.¹, Спиридонов В.Ф.¹

¹Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте
Российской Федерации, Москва

²Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

Оригинальная статья

Резюме. Цель настоящей работы состояла в том, чтобы выяснить, какие из отделов коры, обычно активируемых при решении инсайтных задач, являются источниками вызванной активности в условиях индуцированного инсайта — инсайта, вызванного предъявлением готового решения задачи. В эксперименте приняли участие 35 взрослых испытуемых. В ходе эксперимента испытуемые пытались найти слово, с помощью которого можно образовать словосочетание с тремя зрительно предъявленными заданными словами, — решали задачи на поиск отдаленных ассоциаций (CRA). Записывалось ЭЭГ высокой плотности (128 каналов) при помощи компьютерного электроэнцефалографа (Geodesic EEG System GES 400 Series). Приведены результаты анализа вызванной предъявлением слова-подсказки кортикальной активности в выбранных областях интереса. Полученные результаты находятся в согласии с имеющимися представлениями о функциях отделов коры, задействованных в решении задач. Обсуждается вопрос об усовершенствовании методики эксперимента.

Ключевые слова: решение задач, CRA, индуктивный инсайт, ЭЭГ, спектральная мощность, функциональные связи, эффективные связи

Информация об авторах:

Горностаев Игорь Сергеевич* — e-mail: igor.cognitive.lab@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-0026-5044>

Курганский Андрей Васильевич — e-mail: akurg@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7648-1996>

Вязовкина Варвара Константиновна — e-mail: vyazovkinav@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9157-0604>

Спиридонов Владимир Феликсович — e-mail: vfspiridonov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5081-879X>

Как цитировать: Горностаев И.С., Курганский А.В., Вязовкина В.К., Спиридонов В.Ф. Вызванная кортикальная электрическая активность, связанная с предъявлением готового решения задачи на отдаленные ассоциации. *Обозрение психиатрии и медицинской психологии им. В.М. Бехтерева*. 2025; 59:1:42-52. <http://doi.org/10.31363/2313-7053-2025-1-952>.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Evoked cortical electrical activity associated with the presentation of a Ready-Made solution to a remote association task

Igor S. Gornostaev¹, Andrey V. Kurgansky^{1,2}, Varvara K. Vyazovkina¹, Vladimir F. Spiridonov¹

¹Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russia

² Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Research article

Summary. The purpose of this work was to find out which of the cortical areas, usually activated when solving insight problems, are sources of evoked activity under conditions of induced insight—insight caused by the presentation of a ready-made solution to the problem. A group of 35 adults took part in the experiment. During the experiment, the participants solved compound remote associates (CRA) task, i.e.

Автор, ответственный за переписку: Горностаев Игорь Сергеевич — e-mail: igor.cognitive.lab@gmail.com

Corresponding author: Igor S. Gornostaev — e-mail: igor.cognitive.lab@gmail.com

they tried to find a word that could be used to form a word combination with three given visually presented words. A high-density EEG (128 channels) was recorded using a computer electroencephalograph (Geodesic EEG System GES 400 Series). The results of an analysis of cortical activity evoked by the presentation of a cue word in selected regions of interest are reported. These results are in agreement with what is known about the functions of the cortical areas involved in solving problems. The issue of improving the experimental technique is discussed.

Keywords: problem solving, CRA, inductive insight, EEG, spectral power, functional connections, effective connections

Information about the authors:

Igor S. Gornostaev* — e-mail: igor.cognitive.lab@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-0026-5044>

Andrey V. Kurgansky — e-mail: akurg@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7648-1996>

Varvara K. Vyazovkina — e-mail: vyazovkinav@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9157-0604>

Vladimir F. Spiridonov — e-mail: vfsiridonov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5081-879X>

To cite this article: Gornostaev IS, Kurgansky AV, Vyazovkina VK, Spiridonov VF. Evoked cortical electrical activity associated with the presentation of a Ready-Made solution to a remote association task. *V.M. Bekhterev review of psychiatry and medical psychology*. 2025; 59:1:42-52. <http://doi.org/10.31363/2313-7053-2025-1-952>. (In Russ.)

Conflict of interests: authors declare no conflict of interests.

Инсайт часто понимается как внезапное и существенное изменение репрезентации задачи, приводящее к ее решению [3]. Считается, что эти изменения имеют определенные характеристики, отличающие инсайтное решение задачи от аналитического решения. Например, инсайтное решение (т.е. решение задачи и сопутствующая ему Ага!-реакция) часто сопровождается сильными эмоциями, включая позитивное удивление по поводу содержания решения или способа его реализации. Напротив, аналитические решения обычно не сопровождаются эмоциональной реакцией за исключением, возможно, чувства удовлетворения, возникающего в результате достижения цели. Другая особенность инсайта заключается в том, что такие решения часто появляются как результат выхода из тупика. Тупик возникает, если у решателя изначально сформировалась неадекватная репрезентация задачи или он опирался на неэффективную стратегию решения. Выход из тупика предполагает возникновение новой репрезентации задачи, позволяющей найти решение или путь к нему [31, 33]. При этом решатели обычно не могут сообщить о действиях, которые позволили им преодолеть тупик [3]. В случае же аналитического решения решатель может отчитаться о тех шагах, которые он совершает. Также, инсайтные решения оказываются правильными чаще аналитических [8, 33].

Инсайтное решение задачи можно отличить от неинсайтного и с помощью ряда метакогнитивных критериев. В первом случае решатели не ощущают своего приближения к ответу, и он оказывается для них неожиданным. В случае аналитического решения люди относительно точно оценивают дистанцию до цели и могут объяснить, как к ней пришли [25]. Кроме того, как показывают исследования, инсайтные решения достаточно четко можно вычленить с опорой на набор метакогнитивных показателей: 1) Pleasure (Удовольствие); 2)

Surprise (Удивление); 3) Suddenness (Неожиданность); 4) Relief (Облегчение); 5) Certainty (Уверенность, Определенность); 6) Drive (Азарт) [9].

До недавнего времени в экспериментальных исследованиях инсайта чаще всего использовались классические мыслительные задачи. Например, «9 точек» или «Две веревки» [22, 23]. Такие задачи привлекательны тем, что считались связанными исключительно с процессом инсайтного решения (в противовес аналитическому). Хотя их использование во многом способствовало самой постановке проблемы инсайта, а затем и появлению понятия «инсайтное решение», постепенно подобные исследования стали подвергаться все более последовательной критике [10, 27, 28, 38]. Было показано, что классические инсайтные задачи могут решаться посредством анализа, а их предполагаемый способ решения задан априори, часто участникам нужны дополнительные подсказки, чтобы найти ответ [3, 12]. Эти задачи сложны, зачастую требуют много времени для решения, поэтому далеко не всегда они могут быть использованы в инструментальном эксперименте. Также их решение практически нельзя изучать с помощью методов, требующих большого количества сходных проб, таких как нейровизуализация [3]. Альтернативой использованию классических инсайтных задач является использование более коротких и существенно более простых проблемных ситуаций.

Тест RAT (Remote Associates Test), первоначально разработанный Медником на основе своей ассоциативной теории творческого мышления, — одна из часто используемых процедур оценки конвергентного мышления [24]. Оригинальный RAT включает две группы тестов, каждая из которых состоит из 30 пунктов [24]. Отдельное тестовое задание состоит из трех слов, для которых нужно найти четвертое, связанное с каждым из них. В последние десятилетия ряд исследователей ис-

пользовали эти задачи для изучения поведенческих коррелятов конвергентного мышления [1, 30, 37]. RAT оказался полезным исследовательским инструментом, помогающим прояснить механизмы инсайтного решения. Однако, как оказалось, классические задачи RAT также оказались неподходящими для выявления нейронных коррелятов решения. В целом исследователи столкнулись с несколькими техническими проблемами:

1) RAT, разработанные Медником, обычно достаточно сложны и имеют более одного решения. Это связано с тем, что стандартные задачи RAT могут иметь более одного способа связи слов между собой [5];

2) Имеется сравнительно небольшое количество подобных проблемных ситуаций. Стандартный набор RAT включает только 60 задач, чего недостаточно, чтобы манипулировать экспериментальными переменными и исследовать соответствующие им нейронные корреляты.

Янг-Биман и Боуден разработали новые 144 задачи которые теперь чаще используются в исследованиях [5, 18]. Они получили название Compound Remote Associate (CRA) problems – задачи на отдаленное ассоциирование. В отличие от традиционных RAT задачи CRA могут быть решены только одним способом. Такое изменение имеет как минимум два основных преимущества. С одной стороны, поскольку задачи стали проще и теперь решаются за более короткое время, за одну экспериментальную сессию их можно предъявить гораздо больше. С другой стороны, их простота что позволяет лучше контролировать побочные переменные [5]. Если сравнить классическую задачу «9 точек» с CRA, мы можем обнаружить у первой ряд явных недостатков по сравнению со вторыми. Для решения задачи «9 точек» обычно требуется существенное время, что может вызвать побочные переменные в виде рассеяния внимания, усталости и снижения мотивации из-за нагрузки [14]. Если говорить об исследовании нейронных коррелятов инсайтного решения, то процедура эксперимента предполагает существенное количество повторений, которое не получится реализовать с помощью классических задач. Задача «9 точек» и задания RAT имеют существенные недостатки в этом отношении. С другой стороны, высокая зависимость от особенностей языка создает необходимость разработки отдельных тестов: поэтому наборы CRA были разработаны для 15 языков, включая английский, китайский, немецкий, голландский, иврит, японский, русский и др.

Также стоит отметить, что испытуемые, решая задачи CRA, иногда сообщают об управлении аналитическом поиске ответа, т. е. инсайтное решение не является в этом случае единственным возможным. Для контроля этой переменной применительно к задачам CRA используются метакогнитивные показатели: испытуемых, решавших задачи, просят сообщить, как к ним пришло решение — преимущественно с помощью анализа или в результате инсайта [3, 5, 7]. Другими словами, основываясь на критериях инсайта, их просят

отчитаться, было ли решение неожиданным, пришло ли оно сразу в готовом виде, был ли испытуемый сразу уверен в ответе. Этот методический прием стал частотным в исследованиях.

Инсайтное решение — интересный предмет изучения с помощью инструментальных нейрофизиологических методов. Функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ), функциональная ближняя инфракрасная спектроскопия (fNIRS), а также электроэнцефалография (ЭЭГ) выявили достаточно сложную и неоднозначную картину как в отношении наиболее реактивных областей мозга, так и в отношении наиболее задействованных энцефалографических частотных диапазонов [16, 17, 35]. Также была исследована вызванная (связанная с событиями) активность мозга, ассоциированная с решением инсайтных задач [6, 19, 21]. Однако исследования вызванной активности ограничивались пространством сенсоров, в котором возможности выявления корковых источников наблюдаемых связанных с событиями потенциалов (ССП) ограничены [16, 26], а исследования источников вызванной активности, насколько нам известно, не проводились.

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы выяснить, какие из отделов коры, активируемых (по данным фМРТ) в процессе решения инсайтных задач, являясь источниками вызванной активности в условиях индуцированного инсайта — инсайта, вызванного предъявлением готового решения задачи CRA [13]. Исследование вызванной таким образом мозговой активности является одним из электрофизиологических методов, информативных в отношении связанных с инсайтным решением мозговых процессов. В этом случае анализируется активность, вызванная предъявлением слова-подсказки, которое в половине случаев является искомым ответом, а в половине — нерелевантным словом. Этот подход был применен, в частности, в работе Кизирирмак, где с помощью фМРТ исследовались нейронные корреляты инсайтного решения, индуцированного словом-подсказкой. Слово-подсказка (решение либо нерелевантное слово) предъявлялось после короткого периода времени, в течение которого испытуемый пытался самостоятельно найти решение задачи CRA [15]. При этом предполагалось, что слово-подсказка может вызвать либо внезапное осознание решения (если предъявлялось правильное решение), либо оставить испытуемого в состоянии неопределенности (если подсказано нерелевантное слово). Сравнивая обработку мозгом слов-решений и нерелевантных слов, авторы цитируемой работы обнаружили, что индуцированное понимание решения сопровождается активацией ростральной передней поясной извилины/медиальной префронтальной коры (rACC/mPFC), а также левого гиппокампа.

В настоящей работе, опираясь на описанную парадигму, мы проанализировали в пространстве сенсоров связанные с событиями потенциалы (ССП) в ответ на предъявление слова подсказки. Затем, базируясь на известной из литературы

функциональной анатомии процессов поиска инсайтных решений, мы оценили корковые источники этих ССП в целом ряде корковых областей, относительно которых из нейровизуализационных экспериментов известно, что они принимают участие в решении инсайтных задач [2, 4, 17, 32, 34, 36].

Материалы и методы

В исследование включены студенты в возрасте от 18 до 22 лет, давшие согласие на участие в эксперименте, не имеющие жалоб на ментальное состояние и не стоящие на учете в психоневрологическом диспансере, имеющие нормальное или скорректированное до нормального зрение (отклонения не более 0,5 диоптрий). Все испытуемые были проинформированы о характере предстоящего исследования и дали свое письменное согласие на участие в нем. В ходе эксперимента испытуемые решали задачи на поиск отдаленных ассоциаций (CRA): искали слова, ассоциирующиеся с тремя предъявленными на экране компьютера словами. Использованный набор был разработан сотрудником Лаборатории когнитивных исследований факультета психологии ИОН РАН-ХиГС В.В. Ардисламовым. Всего было использовано 144 задачи (список задач приведен в ПРИЛОЖЕНИИ А). Частотность ответа в русском языке выше 100 ipm и семантическая близость между словами-подсказками и словом-решением выше 0.2, согласно данным Национального корпуса русского языка. Экспериментальная установка состояла из компьютерного электроэнцефалографа (128-каналов, Geodesic EEG System GES 400 Series), объединенного в локальную сеть с отдельно стоящим компьютером (ноутбук с экраном 16.5 дюйма с разрешением 1980x1020 под управлением ОС Xubuntu 22.04 LTS), контролирующим ход эксперимента с помощью управляющей программы. Управляющая программа предъявляла зрительные стимулы, регистрировала двигательные ответы испытуемого и управляла по протоколу TCP/IP

компьютерным электроэнцефалографом, включая и выключая запись ЭЭГ, а также с миллисекундной точностью информируя его о произошедших событиях — начале очередной пробы, моментах предъявления зрительных стимулов и нажатии испытуемым на кнопку. Управляющая программа была реализована в вычислительной среде Octave с использованием функций Psychophysics Toolbox Version 3 (PTB-3).

Методика и процедура эксперимента. Эксперимент включал в себя три этапа. На первом этапе испытуемому давали устную инструкцию, поясняя, какую задачу придется решать, как сообщать о найденном решении, как держать в руках пульт, чтобы минимизировать двигательные артефакты и какие кнопки пульта нажимать в каких случаях. На втором этапе испытуемый в качестве тренировки выполнял короткий блок проб. В течение третьего заключительного этапа испытуемый выполнял блок из 144 проб, в ходе выполнения которого регистрировались поведенческие и электрофизиологические данные.

Проба эксперимента была организована следующим образом (Рис.1). Вначале на экране появлялся фиксационный крест, после чего в центре экрана предъявлялись три слова, для которых требовалось подобрать слово-ответ, связанное с каждым из них. Для поиска решения отводилось фиксированное время 6 секунд. Если до окончания этого периода времени решение было найдено, то испытуемый нажимал кнопку, а затем сообщал (устно) найденное решение экспериментатору. В этом случае проба завершалась. Если решение найдено не было, то испытуемому на экране предъявлялось слово-подсказка, которое в половине случаев было решением задачи (т.е. ассоциацией к трем предъявленным в начале пробы словам), а в половине было нерелевантным словом. Кроме того, в каждом из этих случаев слово-подсказка с равной вероятностью предъявлялось либо в левом (LVF), либо в правом (RVF) полуполе зрения. На этом этапе задачей испытуемого было решить, является ли предъявленное слово-

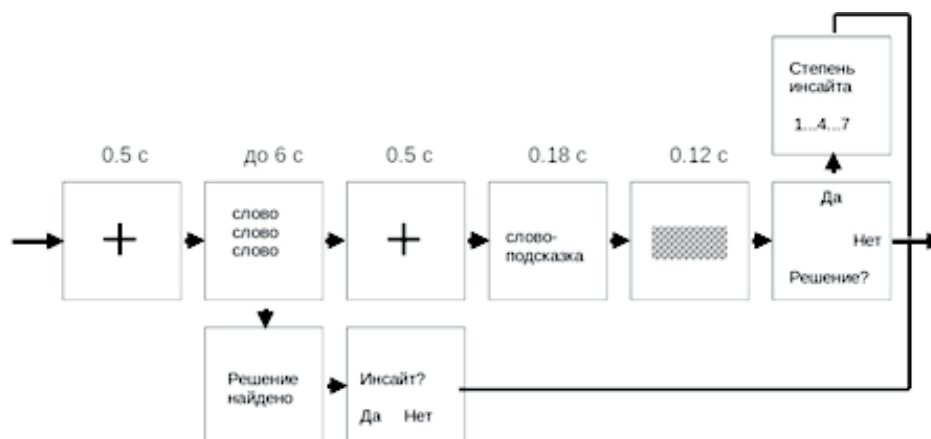


Рис. 1. Последовательность событий в типичной пробе эксперимента
Fig. 1. The sequence of events in an experimental trial

подсказка решением задачи CRA. Для этого он нажимал соответствующую кнопку пульта («Да» или «Нет»). Если испытуемый выбирал вариант «Да», то далее ему предлагалось оценить степень инсайтности своего решения методом субъективного шкалирования — с помощью пульта выбрать одну из цифр 7-балльной шкалы, где «1» соответствовало отсутствию инсайта, а «7» — максимальная степень его выраженности.

Основная (тестовая) сессия эксперимента состояла из одного блока (144 пробы), в которых задачи CRA предъявлялись в квазислучайном, уникальном для каждого испытуемого порядке. На протяжении всего эксперимента регистрировалась электроэнцефалограмма (ЭЭГ) высокой плотности.

Запись и анализ ЭЭГ. ЭЭГ высокой плотности (128 каналов) записывалась при помощи компьютерного электроэнцефалографа (Geodesic EEG System GES 400 Series) в полосе частот 0.1–70 Гц (частота оцифровки 250 Гц) от 129 электродов, расположенных в узлах сетчатого шлема HydroCel GSN (HCGSN), один из которых (вертексный электрод) использовался в качестве референтного. Запись ЭЭГ контролировалась штатной компьютерной программой NetStation, которая, в свою очередь, включалась дистанционно по протоколу TCP/IP управляющей программой — скриптом, реализованным в вычислительной среде Octave.

Для анализа ЭЭГ и в процессе подготовки к нему использовались отдельные материалы и функции системы SPM12, FieldTrip, а также скрипты и функции, разработанные авторами настоящей работы в вычислительной среде Octave / Matlab.

Прежде всего, индивидуальные записи ЭЭГ, созданные штатной программой электроэнцефалографа, преобразовывались в стандартный для Octave/Matlab формат данных (*.mat). На первом этапе подготовки данных индивидуальные записи ЭЭГ анализировались визуально для выявления «плохих» каналов, возникающих при потере соответствующим сенсором электрического контакта с кожным покрытием головы. Номера этих каналов фиксировались и на более поздних этапах анализа, соответствующие сигналы исключались из вычислений.

На следующем этапе с помощью заградительного фильтра из 128-канальной записи ЭЭГ удалялась сетевая наводка 50 Гц вместе с ее гармониками 100 и 150 Гц, осуществлялась полосная фильтрация сигнала в диапазоне от 0.5 до 70 Гц, а затем из непрерывной записи ЭЭГ в районе меток, соответствующих моментам предъявления 3 слов задачи CRA и моменту предъявления слова-подсказки, выделялись отрезки длительностью 200 мс до метки и 800 мс после нее. Из полученных наборов отрезков исключались отрезки содержащие артефакты. Весь отрезок удалялся целиком в автоматическом режиме на основе порогового критерия: отрезок считался артефактным, если (напомним, что постоянная составляющая была удалена за счет полосной фильтрации) амплитуда сигнала превышала 100 мкВ.

Для статистического анализа ЭЭГ в пространстве сенсоров использовалась техника псевдоотведений. Индивидуальные ССП вычислялись не для исходных отведений шлема HCGSN, а для 20 псевдоотведений, соответствующих 8 парам латерально-симметричных отведений (Fp1/2, F3/4, F7/8, C3/4, P3/4, T3/4, P5/6, O1/O2) и четырем сагиттальным отведениям (Fz, Cz, Pz, Oz) схемы 10–20. Сигналы 20 псевдоотведений формировались следующим образом. На шлеме HCGSN были выбраны 20 электродов, соответствующих указанным 20 отведениям схемы 10–20, и для каждого такого электрода выбирались 4 или 5 его ближайших соседей (выбор 4 или 5 соседних каналов определялся соображениями симметрии и компактности — выбранные электроды должны были располагаться на равном расстоянии от центрального). К безартефактным отрезкам ЭЭГ, принадлежащим каждой такой группе каналов (центральному каналу и его 4 или 5 соседям), применялся метод главных компонент, и первая главная компонента (компонента с наибольшей дисперсией) рассматривалась в качестве сигнала, характеризующего скоррелированную активность всей группы каналов. Полученный сигнал масштабировался таким образом, чтобы его средняя квадратичная амплитуда совпадала с таковой для всей группы исходных каналов. Таким образом, в результате описанной процедуры исходная 128-канальная ЭЭГ была заменена на 20 псевдоотведений схемы 10–20, сигналы которых характеризовали ЭЭГ 20 групп реальных отведений на шлеме HCGSN.

Активность корковых источников (токовые диполи) электроэнцефалограммы оценивалась с помощью метода решения обратной задачи электроэнцефалографии для модели распределенных источников, позволяющего преобразовать многоканальную ЭЭГ в дипольные моменты в небольших объемах корковой ткани — вокселях. Для этого (после преобразования каждого 1-секундного отрезка ЭЭГ к усредненному референту) использовался метод eLORETA [29], реализованный вместе с рядом вспомогательных процедур в программном пакете (toolbox) FieldTrip. Поскольку в нашем распоряжении не было ни индивидуальных структурных МРТ-изображений головы, ни положений сенсоров на скальпе, мы использовали стандартную модель головы и среднее положение электродов шлема HCGSN с 129 электродами, доступную в SPM12. Учитывая значительные потенциальные систематические ошибки в определении распределения токовых диполей, мы использовали низкоразмерную версию разбиения коры на воксели (5124 вокселя в стандартной модели коры cortex_5124.surf.gii). Эти данные использовались сначала для вычисления матрицы L (leadfield matrix), связывающей токовые диполи с потенциалом на скальпе (прямая задача электроэнцефалографии), а затем для вычисления восстанавливающей матрицы W (unmixing matrix), позволяющей для каждого момента вре-

Таблица. 1. Используемые в исследовании геометрические центры областей интереса
Table 1. Regions of interest used in the study

Область коры	Обозначение	MNI-координаты центра шара радиусом 10 мм
Область зрительного распознавания слов в веретенообразной извилине	VWFA_FG2_L	-46 -69 -17
Поле Бродмана 7, отдел А, Левая верхняя теменная доля	BA7A_L	-18 -61 64
Поле Бродмана 7, отдел А, Правая верхняя теменная доля	BA7A_R	18 -61 64
Поле Бродмана 7, отдел Р, Левая верхняя теменная доля	BA7P_L	-15 -76 53
Поле Бродмана 7, отдел Р, Правая верхняя теменная доля	BA7P_R	15 -76 53
Передний отдел левой дополнительной моторной области, поле Бродмана 6	BA6_PreSMA_L	-6 8 59
Передний отдел правой дополнительной моторной области, поле Бродмана 6	BA6_PreSMA_R	6 8 59
Левая дополнительная моторная область, поле Бродмана 6	BA6_SMA_L	-6 -12 60
Правая дополнительная моторная область, поле Бродмана 6	BA6_SMA_R	6 -11 56
Поле Бродмана 22, часть зоны Вернике левой верхней височной извилины	BA22_L	-68 -21 3
Поле Бродмана 32, дорсальная часть передней поясной коры	BA32_dACC_L	-6 51 7
Поле Бродмана 24, вентральная часть передней поясной коры	BA24_vACC_L	-5 38 -1
Поле Бродмана 47, отдел Fo7 правой фронто-орбитальной коры	OFC_BA47_Fo7_R	52 39 -12
Поле Бродмана 47, отдел Fo6 правой фронто-орбитальной коры	OFC_BA47_Fo6_R	36 42 -12
Поле Бродмана 44, часть зоны Брока левой нижней лобной извилины	BA44_L_1	-53 11 21
Поле Бродмана 44, часть зоны Брока левой нижней лобной извилины	BA44_L_2	-53 17 7
Поле Бродмана 45, часть зоны Брока левой нижней лобной извилины	BA45_L_1	-55 25 20
Поле Бродмана 45, часть зоны Брока левой нижней лобной извилины	BA45_L_2	-55 29 4
Слуховая область левой верхней височной извилины	STG_TE3_L	-62 -1 -3
Слуховая область левой верхней височной извилины	STG_TE5_L_1	-55 -1 -19
Слуховая область левой верхней височной извилины	STG_TE5_L_2	-58 -3 -21
Слуховая область левой средней височной извилины	MTG_TE5_L	-59 -5 -18
Левая нижняя височная извилина	ITG_L	-47 -5 -43
Левая дорсолатеральная префронтальная кора	dIPFC_L_MFG	-43 30 38
Правая дорсолатеральная префронтальная кора	dIPFC_R_MFG	-43 30 38

мени вычислить токовые диполи в отдельных вокселях корковой ткани по вектору значений потенциала на 129 сенсорах.

В дальнейшем анализе участвовали токовые диполи не во всех вокселях, а только в группах вокселей, принадлежащих выбранным заранее областям интереса (ОИ: от «regions of interests» — ROI).

Для выбора геометрических центров областей интереса (ОИ) использовался стандартный анатомический атлас, входящий в систему SPM12 (SPM Anatomy Toolbox, Version 3.0) [11].

В Табл.1 перечислены все выбранные области интересов, даны их краткие обозначения и приведены MNI-координаты их центров. В качестве

границы области интереса использовалась сфера радиусом 10 мм. В качестве принадлежащих данной области интереса рассматривались все воксели, расположенные внутри такой сферы при условии, что они принадлежали одному и тому же полушарию (если сфера с центром в одном полушарии частично охватывала воксели другого полушария, то последние исключались из области интереса). Дальнейшему анализу подвергались не временные ряды отдельных вокселей, а сигнал, характеризующий активность всех вокселей в представленном центре области интереса. В качестве такого сигнала использовался первый главный компонент (компонент, характеризующий наибольшей дисперсией) разложения всей совокупности временных рядов данной ОИ на главные компоненты (PCA). Таким образом, каждый центр области интереса характеризовался одним сигналом, характеризующим сигналы всех вокселей, принадлежащих этой зоне. В нескольких случаях мы выбирали два центра области интереса в пределах одной анатомической структуры: это связано с тем, что заранее не было ясно, какая именно часть, как правило, геометрически протяженной структуры участвует в обеспечении интересующей нас функции.

Проверка статистических гипотез проводилась с помощью дисперсионного анализа с повторными измерениями и теста Стьюдента для связанных выборок.

Результаты

Вызванные ответы мозга. Пространство сенсоров. Вызванные ответы на предъявление трех слов отчетливо видны на рис. 2 слева. Справа, на Рис.2, показаны карты четырех компонентов ССП с латентностями 112, 216, 296 и 356 мс.

Анализ вызванных предъявлением слова-подсказки ответов в пространстве сенсоров показал наличие 9 компонентов с латентностями 64, 148, 200, 280, 356, 460, 540, 572, 620 мс. Следует подчеркнуть, что в силу интерференции поздних компонентов коркового ответа на слово-подсказку и ранних компонентов ССП на технические зрительные стимулы (маску и следующий за ней вопрос «Решение?», (см. рис.1), термин «компонент» по отношению здесь употребляется достаточно условно.

При предъявлении в каждое из полушарий зрения отдельно для каждого из 9 компонентов (9 значений латентности) был выполнен дисперсионный анализ величины ССП по схеме с повторными измерениями с следующими внутрииндивидуальными факторами: РЕШЕНИЕ (да, нет), ПОЛУШАРИЕ (левое, правое) и ПСЕВДООТВЕДЕНИЕ (7 пар: F7/8 F3/4 T3/4 C3/4 T5/6 P3/4 O1/2). Эта серия тестов выявила всего три формально статистически значимых эффекта.

При предъявлении в левое полушарие зрения было обнаружено тройное взаимодействие РЕШЕНИЕ x ПОЛУШАРИЕ x ПСЕВДООТВЕДЕНИЕ ($F(6, 27) = 3.924$; $p = 0.006$; $\eta^2_p = 0.466$) для значения

латентности 540 мс и двойное взаимодействие РЕШЕНИЕ x ПОЛУШАРИЕ ($F(1, 32) = 4.311$; $p = 0.046$; $\eta^2_p = 0.119$) для значения латентности 572 мс. При предъявлении слова-подсказки в правое полушарие зрения значимым оказалось РЕШЕНИЕ x ПОЛУШАРИЕ x ПСЕВДООТВЕДЕНИЕ ($F(6, 27) = 2.533$; $p = 0.045$; $\eta^2_p = 0.360$) для значения латентности 540 мс.

Вызванные ответы мозга. Пространство источников. При анализе вызванных ответов на слово-подсказку в пространстве источников для каждой из 25 ОИ был выполнен дисперсионный анализ с повторными измерениями с факторами РЕШЕНИЕ (да, нет), ПОЛУПОЛЕ (левое, правое), ЛАТЕНТНОСТЬ (9 уровней). Результаты этой серии тестов приведены в Табл.2.

Кроме того, с целью оценить влияния степени инсайтности на вызванную активность в ОИ для каждой выявления из 25 зон был выполнен дисперсионный анализ по схеме с повторными измерениями с факторами ИНСАЙТНОСТЬ (высокая, низкая) и ЛАТЕНТНОСТЬ (9 уровней). Результаты этой серии тестов приведены в Табл.3.

Обсуждение

Ценные сведения об ансамбле взаимодействующих мозговых структур могло бы дать сравнение вызванной активности, связанной с предъявлением трех слов, и вызванной активности, связанной с предъявлением слова-подсказки. К сожалению, в рамках использованной нами парадигмы это представляется невозможным по двум причинам. Во-первых, три слова предъявляются центрально, а слово-подсказка латерально; и мы видели, насколько существенно вызванный ответ зависит от того, в какое полушарие зрения предъявлено слово. Во-вторых, проблему представляет наличие близко расположенных по времени к моменту предъявления слова-подсказки двух технических зрительных стимулов, которые также вызывают ответ коры головного мозга. Присутствие стимула с вопросом «Решение?» и, в особенности, зрительной маски вызывает наложение ранних компонентов (P100 и N200) этих технических стимулов на поздние компоненты мозгового ответа на слова-подсказку.

Ввиду особенностей эксперимента мы не могли анализировать больший период постстимульной ЭЭГ в случае слова-подсказки, поскольку в том случае, когда оно являлось решением задачи, испытуемый должен был интерактивно в ответ на зрительную стимуляцию оценить степень инсайтности предлагаемого решения. Эти действия вносили существенное искажение в ЭЭГ (в том числе зрительные и двигательные артефакты). Однако исследование доступного нам 800-миллисекундного постстимульного интервала свидетельствует о чувствительности к связанным с инсайтом процессам относительно поздних компонентов ССП. В этом отношении полученные нами результаты качественно согласуются с данными литературы [6, 19, 21]. Однако в отношении задействованных

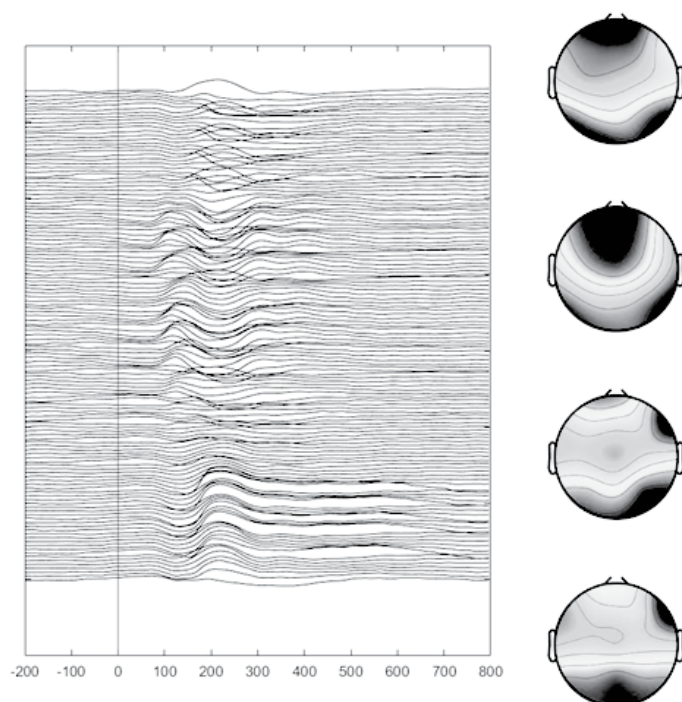


Рис. 2. Потенциалы, связанные с предъявлением слова-подсказки. Слева показаны потенциалы в 128 каналах шлема HCGSN, справа — распределение потенциала на скальпе для четырех значений латентности (сверху-вниз): 112, 216, 296 и 356 мс.

Fig 2. Potentials associated with the presentation of a cue word. On the left are potentials in 128 channels of the HCGSN helmet, on the right is the distribution of the potential across the scalp for four latency values (from top to bottom): 112, 216, 296 and 356 ms.

Таблица 2. Влияние слова-подсказки на вызванную активность в геометрических центрах областей интереса

Table 2. Effect of cue word on evoked activity in the ROI

ОИ	Эффект
BA6_SMA_L	РЕШЕНИЕ x ПОЛУПОЛЕ x ЛАТЕНТНОСТЬ: $F(8,24) = 3.121$; $p = 0.015$; $\eta^2p = 0.510$
BA22_L	РЕШЕНИЕ x ПОЛУПОЛЕ: $F(1, 31) = 7.895$; $p = 0.009$; $\eta^2p = 0.203$
BA22_L	РЕШЕНИЕ x ЛАТЕНТНОСТЬ: $F(8, 24) = 2.959$; $p = 0.019$; $\eta^2p = 0.497$
BA24_vACC_L	РЕШЕНИЕ x ЛАТЕНТНОСТЬ: $F(8, 24) = 3.451$; $p = 0.009$; $\eta^2p = 0.535$
BA24_vACC_L	РЕШЕНИЕ x ПОЛУПОЛЕ x ЛАТЕНТНОСТЬ: $F(8, 24) = 2.847$; $p = 0.022$; $\eta^2p = 0.487$
OFC_BA47_Fo7_R	РЕШЕНИЕ: $F(1, 31) = 4.844$; $p = 0.035$; $\eta^2p = 0.135$
OFC_BA47_Fo6_R	РЕШЕНИЕ x ПОЛУПОЛЕ x ЛАТЕНТНОСТЬ: $F(8, 24) = 2.848$; $p = 0.022$; $\eta^2p = 0.487$
STG_TE5_L	РЕШЕНИЕ x ЛАТЕНТНОСТЬ: $F(8, 24) = 2.541$; $p = 0.037$; $\eta^2p = 0.459$

Таблица 3. Влияние степени инсайтности, предлагаемого словом-подсказкой решения на вызванную активность в ОИ

Table 3. The influence of the degree of insight produced by the hint word solution, on the evoked activity in the ROI

Области интереса	Эффект
BA32_dACC	ИНСАЙТНОСТЬ: $F(1, 24) = 4.349$; $p = 0.048$; $\eta^2p = 0.153$
OFC_BA47_Fo6_R	ИНСАЙТНОСТЬ: $F(1, 24) = 7.209$; $p = 0.013$; $\eta^2p = 0.231$

энцефалографических отведений наша работа, работа Дж. Чена [6], Дж. Луо [19], С. Лытаева [21] и показали разные результаты. В отношении работы С. Лытаева это можно объяснить тем, что в ней использовалась другая задача — не CRA — испытуемым предъявляли иллюзорное изображение. Что касается исследований работ Дж. Чена и Дж. Луо, то в этих работах при оценке вызванной активности практически не удалялись низкие частоты: в отличие от нашей работы и работы С. Лытаева. Дж. Луо и соавторы оставляли сигнал в полосе от 0.05 до 80 Гц, а Дж. Чен с соавторами — в полосе 0.01 до 100 Гц. [6, 19]. По данным этих двух работ для решений, сопровождаемых «ага-реакцией», по сравнению с теми, где не было такой реакции, был характерен меньший уровень позитивности во всем постстимульном диапазоне латентностей от 0 до 2000 мс. [6].

В настоящей работе при сравнении кортикальной активности, вызванной решением, и той, что вызвана нерелевантным словом, было обнаружено, что чувствительными к такому различию в характере слова-подсказки являются области верхней височной извилины в области зоны Вернике (см. Таблицу 2), области Fо6 и Fо7 правой фронто-орбитальной коры и вентральные отделы передней поясной (цингулярной) коры. Эти результаты хорошо укладываются в известные функции этих кортикальных отделов. Считается, что фронтоорбитальная кора участвует в формировании, связанного с переживанием инсайта сигналом награды, а участие передней поясной коры связано с ее функцией в разрешении когнитивных конфликтных ситуаций [8, 15, 20, 26].

Следует отметить, ограничения настоящего исследования. Во-первых, в нашем распоряжении не было ни индивидуальных структурных МРТ каждого испытуемого, ни точных положений электро-

дов на голове. Использование нами усредненного положения электродов и стандартного структурного МРТ несомненно приводило к смещению положения корковых источников, что при усреднении большой группы участников эксперимента привело к дополнительной вариативности в определении корковых источников.

Во-вторых, нами было выполнено достаточно большое число статистических тестов, что не могло не привести к накоплению ошибки второго рода.

Наконец, буквальное воспроизведение экспериментальной парадигмы из работы Янг-Бимана [13] привело к интерференции между интересующими нас компонентами ССП на слово-подсказку и компонентами следующих за ним технических стимулов — маски и вопроса «Решение?» испытуемому.

Заключение

Различия в кортикальной активности, вызванной предъявлением готового решения проблемы CRA, были обнаружены во фронто-орбитальной коре правого полушария, в верхней височной коре левого полушария вблизи зоны Вернике, и в передней части поясной (цингулярной) коры. Полученные различия находятся в согласии с известными и предполагаемыми функциями задействованных отделов височной, фронто-орбитальной и поясной коры в процессе решения инсайтных задач. Исследование вызванной активности в парадигме CRA при зрительном предъявлении задачи предполагает отсутствие технических зрительных стимулов вблизи момента предъявления слова-подсказки. Судя по литературным данным технические стимулы должны быть задержаны более, чем на 2 секунды относительно момента предъявления слова-подсказки.

Литература / References

1. Ansburg PJ, Hill K. Creative and analytic thinkers differ in their use of attentional resources. *Personality and Individual Differences*. 2003;34(7):1141-1152. [https://doi.org/10.1016/S0191-8869\(02\)00104-6](https://doi.org/10.1016/S0191-8869(02)00104-6)
2. Bartolomé G, Vila S, Torrelles-Nadal C, Blanco E. Right Cortical Activation During Generation of Creative Insights: An Electroencephalographic Study of Coaching. *Frontiers in Education*. 2022;7. <https://doi.org/10.3389/feduc.2022.753710>
3. Bowden EM Et al. New approaches to demystifying insight. *Trends in cognitive sciences*. 2005;9(7):322-328. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.05.012>
4. Bowden EM, Jung-Beeman M. Methods for investigating the neural components of insight. *Methods*. 2007;42(1):87-99. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2006.11.007>
5. Bowden EM, Jung-Beeman M. Normative data for 144 compound remote associate problems. *Behavior research methods, instruments, & computers*. 2003;35:634-639. <https://doi.org/10.3758/BF03195543>
6. Chen J, Zhang K, Du X, Pan J, Luo J. The Neural Mechanisms of the Effect of Spontaneous Insight on Re-Solution: An ERP Study. *J Intell*. 2023;11(1):10. <https://doi.org/10.3390/jintelligence11010010>
7. Cranford EA, Moss J. Is insight always the same? A protocol analysis of insight in compound remote associate problems. *The Journal of Problem Solving*. 2012;4(2):8. <https://doi.org/10.7771/1932-6246.1129>
8. Danek AH, Flanagin VL. Cognitive conflict and restructuring: The neural basis of two core components of insight. *AIMS Neurosci*. 2019;6(2):60-84. <https://doi.org/10.3934/Neuroscience.2019.2.60>
9. Danek AH, Wiley J. What about False Insights? Deconstructing the Aha! Experience along Its Multiple Dimensions for Correct and Incorrect Solutions Separately. *Front Psychol*. 2017;7:2077. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.02077>

10. Duncker K. On problem-solving. *Psychological monographs*. 1945;58(5): i113.
<https://doi.org/10.1037/h0093599>
11. Eickhoff SB, Stephan KE, Mohlberg H, Grefkes C, Fink GR, Amunts K, Zilles K. A new SPM toolbox for combining probabilistic cytoarchitectonic maps and functional imaging data. *Neuroimage*. 2005;25(4):1325-35.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.12.034>
12. Fleck I, Jessica I, Robert W Weisberg. «The use of verbal protocols as data: An analysis of insight in the candle problem.» *Memory & cognition* 2004;32: 990-1006.
<https://doi.org/10.3758/BF03196876>
13. Jung-Beeman M, Bowden EM, Haberman J, Frymiare JL, Arambel-Liu S, Greenblatt R, Reber PJ, Kounios J. Neural activity when people solve verbal problems with insight. *PLoS Biol*. 2004;2(4):E97.
<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0020097>
14. Kershaw TC, Ohlsson S. Multiple Causes of Difficulty in Insight: The Case of the Nine-Dot Problem. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*. 2004;30(1):3-13.
<https://doi.org/10.1037/0278-7393.30.1.3>
15. Kizilirmak JM, Thuerich H, Foltz-Schoofs K, Schott BH, Richardson-Klavehn A. Neural Correlates of Learning from Induced Insight: A Case for Reward-Based Episodic Encoding. *Front Psychol*. 2016;7:1693.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01693>
16. Knyazev GG; Ushakov VI; Orlov VA; Malakhov DG; Kartashov SI; Savostyanov AN; Bocharov AV; Velichkovsky BM. EEG and fMRI Correlates of Insight: A Pilot Study. *Symmetry*. 2021;13.
<https://doi.org/10.3390/sym13020330>
17. Kounios J, Beeman M. The cognitive neuroscience of insight. *Annu Rev Psychol*. 2014;65:71-93.
<https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010213-115154>
18. Lee CS, Theriault DJ. The cognitive underpinnings of creative thought: A latent variable analysis exploring the roles of intelligence and working memory in three creative thinking processes. *Intelligence*. 2013;41(5):306-320.
<https://doi.org/10.1016/j.intell.2013.04.008>
19. Luo J, Li W, Fink A, Jia L, Xiao X, Qiu J, Zhang Q. The time course of breaking mental sets and forming novel associations in insight-like problem solving: an ERP investigation. *Exp Brain Res*. 2011;212(4):583-591.
<https://doi.org/10.1007/s00221-011-2761-5>
20. Luo J, Niki K, Phillips S. The function of the anterior cingulate cortex (ACC) in the insightful solving of puzzles: The ACC is activated less when the structure of the puzzle is known. *J Psychol Chin Soc*. 2004;5:195-213
21. Lytaev S. Long-Latency Event-Related Potentials (300-1000 ms) of the Visual Insight. *Sensors (Basel)*. 2022;22(4):13-23.
<https://doi.org/10.3390/s22041323>
22. Maier NRF. Reasoning in humans. I. On direction. *Journal of comparative Psychology*. 1930;10(2):115.
<https://doi.org/10.1037/h0073232>
23. Maier NRF. Reasoning in humans. II. The solution of a problem and its appearance in consciousness. *Journal of Comparative Psychology*. 1931;12(2):181-194.
<https://doi.org/10.1037/h0071361>
24. Mednick MT, Halpern S. Remote associates test. *Psychological Review*. 1968;2(3).
<https://doi.org/10.1002/j.2162-6057.1968.tb00104.x>
25. Metcalfe J. Premonitions of insight predict impending error. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*. 1986;12(4):623-634.
<https://doi.org/10.1037/0278-7393>
26. Oh Y, Chesebrough C, Erickson B, Zhang F, Kounios J. An insight-related neural reward signal. *Neuroimage*. 2020;214:116757.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116757>
27. Ohlsson S. Information-processing explanations of insight and related phenomena. *Advances in the psychology of thinking*. 1992;1:1-44.
28. Ohlsson, S. Restructuring revisited: II. An information processing theory of restructuring and insight. *Scandinavian journal of psychology*, 1984;25(2):117-129.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.1984.tb01005.x>
29. Pascual-Marqui RD, Lehmann D, Koukkou M, Kochi K, Anderer P, Saletu B, Tanaka H, Hirata K, John ER, Prichep L, Biscay-Lirio R, Kinoshita T. Assessing interactions in the brain with exact low-resolution electromagnetic tomography. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2011;13:369(1952):3768-84.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0081>
30. Rowe G, Hirsh JB, Anderson AK. Positive affect increases the breadth of attentional selection. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2007;104(1):383-388.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0605198104>
31. Salvi C et al. Sudden insight is associated with shutting out visual inputs. *Psychonomic bulletin & review*. 2015;22:1814-1819. <https://doi.org/10.3758/s13423-015-0845-0>
32. Salvi C, Beeman M, Bikson M, McKinley R, Grafman J. TDCS to the right anterior temporal lobe facilitates insight problem-solving. *Sci Rep*. 2020;10(1):946.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-57724-1>
33. Salvi C, Bricolo E, Kounios J, Bowden E, Beeman M. Insight solutions are correct more often than analytic solutions. *Think Reason*. 2016;22(4):443-460.
<https://doi.org/10.1080/13546783.2016.1141798>
34. Shen W, Tong Y, Li F, Yuan Y, Hommel B, Liu C, Luo J. Tracking the neurodynamics of insight: A meta-analysis of neuroimaging studies. *Biol Psychol*. 2018;138:189-198.
<https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2018.08.018>

35. Sheth BR, Sandkühler S, Bhattacharya J. Posterior Beta and anterior gamma oscillations predict cognitive insight. *J Cogn Neurosci*. 2009;21(7):1269-79. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21069>
36. Subramaniam K, Kounios J, Parrish TB, Jung-Beeman M. A brain mechanism for facilitation of insight by positive affect. *J Cogn Neurosci*. 2009;21(3):415-32. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21057>
37. Vohs KD, Heatherton TF. Self-esteem and threats to self: Implications for self-construals and interpersonal perceptions. *Journal of personality and social psychology*. 2001;81(6):1103. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.81.6.1103>
38. Wertheimer M., Wertheimer M. *Productive thinking*. New York: Harper; 1959.

Сведения об авторах

Горностаев Игорь Сергеевич — магистрант клинической психологии, стажер-исследователь в научно-исследовательской лаборатории когнитивных исследований Института общественных наук Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ (119571, г. Москва, пр-т Вернадского, д.82, стр.1). E-mail: igor.cognitive.lab@gmail.com

Курганский Андрей Васильевич — д.б.н., старший научный сотрудник в научно-исследовательской лаборатории когнитивных исследований Института общественных наук Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, ведущий научный сотрудник лаборатории математической нейробиологии обучения ФГБУН «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН» (117485, г. Москва, ул. Бутлерова, 5а). E-mail: akurg@yandex.ru

Вязовкина Варвара Константиновна — выпускник магистратуры факультета психологии Института общественных наук Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ. E-mail: vyazovkinav@yandex.ru

Спиридонов Владимир Феликсович — д.пс.н., профессор, декан факультета психологии, заведующий научно-исследовательской лабораторией когнитивных исследований Института общественных наук Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ. E-mail: vfspiridonov@yandex.ru

Поступила 25.11.2024

Received 25.11.2024

Принята в печать 10.12.2024

Accepted 10.12.2024

Дата публикации 20.03.2025

Date of publication 20.03.2025