



УДК 159.955:612.821.2:612.821.3

doi: 10.21702/rpj.2019.2.1.4

Электронцефалографические корреляты активности фронтопариетальной системы как предикторы вербального интеллекта и невербальной креативности

Ольга М. Разумникова*, Ксения Д. Кривоногова

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

* E-mail: razoum@mail.ru

Аннотация

Введение. Известно, что фронтопариетальная система принимает участие в организации и интеллектуальных, и креативных функций, однако единого мнения относительно взаимодействия этих функций и их отражения в активности фронтопариетальных отделов мозга пока не сложилось. В связи с этим целью исследования стало определение паттернов нейронных осцилляций, которые могли бы быть предикторами вербального и образного компонентов интеллекта и/или образной креативности.

Методы. Для анализа активности фронтопариетальной системы использовали метод многоканальной электронцефалографии (ЭЭГ). В исследовании принимали участие 37 студентов университета. Фоновую мощность ЭЭГ в 6-ти частотных диапазонах от дельта до бета2 сопоставляли с показателями вербального (IQ_v) и образного (IQ_f) компонентов интеллекта согласно методике Амтхауэра и образной оригинальности при выполнении субтеста Торренса «Незавершенные фигуры» (НФ).

Результаты. При сравнении групп с высокими и низкими значениями IQ_v или НФ установлен общий эффект асимметрии активности передне- и заднефронтальных областей на бета1 частоте и большая мощность дельта ритма во фронтальных областях коры при более высоком IQ_v и в центрально-париетальной коре – при высокой образной оригинальности, сопровождающейся также большими значениями альфа1 ритма в центральных и альфа2 – во фронтальных областях коры. Для НФ и IQ_v получены сходные регрессионные модели с мощностью дельта ритма во фронтальных отведениях левого полушария как основным предиктором интеллектуальных и креативных способностей.

Обсуждение результатов. Сходство регрессионных моделей для НФ и IQ_v при более широком частотном и регионарном представительстве различий в ЭЭГ коррелятах образной оригинальности следует рассматривать как доказательство того, что интеллект (и структуры с ним связанные) является необходимым, но не достаточным условием креативности. Обнаруженная частотно-пространственная



связь НФ и IQv может быть обусловлена сходной организацией исполнительного контроля выполнения образного задания.

Ключевые слова

фронтотемпоральная система, электроэнцефалограмма, дельта осцилляции, альфа осцилляции, бета осцилляции, вербальный интеллект, невербальная креативность, образная оригинальность

Основные положения

- ▶ фоновая активность фронтальных областей коры в низкочастотном дельта и высокочастотном бета диапазоне является предиктором как невербальной креативности, так и вербального интеллекта;
- ▶ при общем сходстве регрессионных моделей невербальной креативности и вербального интеллекта, лица, отличающиеся образной оригинальностью, дополнительно характеризуются изменениями в мощности альфа1, альфа2 и бета2 осцилляций;
- ▶ фоновая активность фронтотемпоральной системы, связанная с образной оригинальностью, представлена более широко как по частотному диапазону, так и регионально в сравнении с ЭЭГ коррелятами вербального интеллекта.

Для цитирования

Разумникова, О. М. и Кривоногова, К. Д. (2019). Электроэнцефалографические корреляты активности фронтотемпоральной системы как предикторы вербального интеллекта и невербальной креативности. *Российский психологический журнал*, 16(2/1), 45–59. doi: 10.21702/rpj.2019.2.1.4

Материалы статьи получены 24.08.2019

Введение

Интенсивные исследования нейрофизиологических коррелятов креативности последних лет выявили ключевое значение функций фронтотемпоральной системы, связанных с поиском идеи или исполнительным контролем при выборе оригинального решения проблемы (Beaty, Benedek, Wilkins, & Jauk, 2014; Beaty, Seli, & Schacter, 2019; Gulbinaite, van Rijn, & Cohen, 2014; Heinonen, Numminen, Hlushchuk, Antell, Taatila, & Suomala, 2016). С другой стороны, взаимодействие этих областей мозга рассматривают как нейрофизиологическую основу реализации интеллектуальных способностей (Beaty et al., 2014; Jung & Haier, 2007; Hearne, Mattingley, & Cocchi, 2016; Lee et al., 2006; Pamplona, Neto, Rosset, Rogers, & Salmon, 2015), что неудивительно, учитывая необходимость исполнительного контроля решения задач при тестировании интеллекта.



С использованием метода диффузионной трактографии выявлена, однако, специализация архитектуры нейронных сетей во взаимодействии структур фронтопариетальной системы и системы мозга по умолчанию (DMN), связанных с интеллектом или креативностью. Показано, что интеллект представлен системой «легкого» достижения функционального состояния с включением правой верхней париетальной области при низких интеграционных способностях левой ретроспленальной коры, а креативность, которую оценивали на основе батареи вербальных субтестов Торренса – системой «сложного» переключения связности корковых областей с центром в правой дорзолатеральной префронтальной коре при высоких интеграционных способностях сенсомоторной коры (Kenett, 2018). Причем интегральный показатель оригинальности ответов характеризовался «узлом» связности в задней части верхней височной извилины, что предполагает участие речевых функций в генерации идей. Анализ активности мозга, связанной с невербальной креативностью, наряду с широко распределенной билатеральной сетью нейронных структур продемонстрировал доминирование левого полушария, в том числе левой дорзолатеральной префронтальной коры (Aziz-Zadeh, Liew, & Dandekar, 2013) или левой передней сингулярной коры (Hahn, Kim, Park, & Lee, 2017), участие которых признается необходимым для выбора оригинального решения задачи.

Для изучения механизмов функционального взаимодействия корковых областей наряду с функциональной магнитно-резонансной томографией (фМРТ) продолжают широко использоваться традиционные методы анализа ЭЭГ (Herrmann, Strüber, Helfrich, & Engel, 2016; Stevens & Zabelina, 2019). Чаще других среди частотных диапазонов биопотенциалов рассматриваются особенности альфа-ритма как индикатора процессов активации или торможения в нейронных сетях (Benedek, Jauk, Sommer, Arendasy, & Neubauer, 2014; Fink & Benedek, 2014; Lustenberger, Boyle, Foulser, Mellin, & Fröhlich, 2015; Razumnikova, 2007). Связанные с креативностью изменения синхронизации альфа биопотенциалов во фронтальных областях, отмеченные разными авторами, оказываются зависимыми от уровня и интеллекта, и креативности участников экспериментов (Benedek et al., 2014; Lustenberger et al., 2015; Разумникова, 2009а; Дикая и Дикий, 2015; Нагорнова, 2007; Benedek, Bergner, Könen, Fink, & Neubauer, 2011). Положительная взаимосвязь интеллекта и креативности подтверждается результатами как психометрических, так и нейрофизиологических исследований (Jauk, Benedek, Dunst, & Neubauer, 2013; Karwowski et al., 2016; Nusbaum & Silvia, 2011; Preckel, Holling, & Wiese, 2006). Однако мнения расходятся относительно «порогового» эффекта в соотношении этих психометрических конструкторов (Jauk et al., 2013; Nusbaum & Silvia, 2011; Preckel et al., 2006) или регионарной специфики этого эффекта (Benedek et al., 2014; Разумникова, 2009б; Arden, Chavez, Grazioplene, & Jung, 2010; Jung,



Mead, Carrasco, & Flores, 2013; Pidgeon et al., 2016). В специально организованном исследовании с анализом роли трех специфических компонентов исполнительской системы: обновления ресурсов информации, переключения и торможения, на основе структурного подхода с латентными переменными были рассмотрены их общие и дифференциальные отношения с флюидным интеллектом и способностями к дивергентному мышлению. Оказалось, что предикторами креативности являются торможение и обновление рабочей памяти, последний компонент объяснял также вариативность IQ (Benedek et al., 2014). Баланс между фоновой активностью фронтальных и задних отделов коры рассматривается как основа для выбора индивидуального когнитивного стиля, в том числе предпочтения инсайтной или аналитической стратегии решения проблемы (Benedek et al., 2014; Erickson et al., 2018; Kounios et al., 2008). Предикторами такого баланса выступают и низкочастотные тета, альфа, и высокочастотные бета осцилляции (Heinonen et al., 2016; Stevens & Zabelina, 2019; Solomon et al., 2017).

Ранее, при использовании в качестве модели креативности решение эвристической задачи, было показано усиление взаимодействия нейронных ансамблей в передних областях коры и в левом полушарии у лиц с высоким интеллектом и креативностью по сравнению с теми, кто обладал меньшими значениями этих показателей (Разумникова, 2009а). Этот вывод был сделан на основании анализа когерентности ЭЭГ, и эффекты взаимодействия факторов «креативность» и «интеллект» были представлены в широком диапазоне частот от тета1 до бета 2 и преимущественно для показателей образного интеллекта.

Согласно классическому представлению о двух стадиях креативного мышления генерацию идей связывают с диффузным вниманием и нейронными процессами «снизу-вверх» (bottom-up), а их оценивание – с фокусированным вниманием и исполнительным контролем, т. е. процессами «сверху-вниз» (top-down) (Jung et al., 2013). Эти процессы обеспечивает кооперация DMN и системы исполнительного контроля (Beaty et al., 2014; Benedek et al., 2014). Так как состояние DMN отражает разнообразные индивидуальные характеристики личности, в том числе – интеллект или креативность (Beaty et al., 2019; Li, Yang, Zhang, Li, & Qiuc, 2016; Takeshi, Aihara, Shimokawa, & Yamashita, 2018), неудивительно, что уникальное взаимодействие указанных нейронных структур создает вариативные паттерны активации – торможения, которые находят свое отражение в частотно-пространственных характеристиках ЭЭГ. В связи с этим, целью исследования стало выяснение таких паттернов нейронных осцилляций во фронтальных и центрально-париетальных отделах мозга, которые связаны с вербальным или зрительно-пространственным компонентами интеллекта и креативности и могут служить предикторами их уровня.

Гипотезы исследования:



- фоновая активность фронтопариетальной системы головного мозга связана с психометрическими показателями интеллекта и креативности с более широким частотно-пространственным представительством для образной оригинальности;
- модели описания интеллекта и креативности имеют как сходные ЭЭГ предикторы активности фронтальной коры, так и регионарно и частотно специфические.

Методы

В исследовании принимали участие 37 человек (студенты $18 \pm 1,1$ лет; 27 девушек и 10 юношей).

Для определения вербального и образного (зрительно-пространственного) компонентов интеллекта использовали тест структуры интеллекта Амтхауэра. Для оценки образной креативности использовали субтест Торренса «Незавершенные фигуры». Показатель оригинальности вычисляли на основе компьютеризированной методики как число, обратное количеству таких же идей рисунков, сохраненных в базе данных (Разумникова, 2002).

Регистрацию ЭЭГ в состоянии спокойного бодрствования с закрытыми глазами выполняли с помощью аппаратуры и программного обеспечения «Мицар-201» в 19-ти отведениях (Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1, O2), расположенных согласно системе 10/20, с объединенным референтным ушным электродом. Для анализа активности мозга выбирали 2-секундные безартефактные отрезки ЭЭГ общей длительностью 60 с. Для каждого отведения методом быстрого преобразования Фурье вычисляли спектральную плотность ЭЭГ в шести частотных диапазонах: дельта (1–4 Гц), тета (4–7 Гц), альфа1 (7–10 Гц), альфа2 (10–13 Гц), бета1 (13–20 Гц) и бета2 (20–30 Гц). Для статистического анализа использовали натуральный логарифм значений мощности ЭЭГ.

Результаты

Показатели интеллекта и оригинальности при выполнении задания на образную креативность в группах мужчин и женщин достоверно не отличались ($0,40 < p < 0,65$), и дальнейший анализ выполняли для общей группы. Корреляционный анализ выявил положительную связь между IQv и IQs ($r = 0,39$ при $p < 0,015$). С показателем образной оригинальности достоверная связь не обнаружена ни для IQv, ни для IQs ($r = 0,25$ и $0,06$, соответственно).

Для дальнейшего анализа ЭЭГ коррелятов IQv, IQs и креативности были сформированы группы с высокими (IQv1, IQs1, НФ1) или низкими (IQv0, IQs0, НФ0) оценками интеллекта и образной оригинальности, исходя из среднего значения для каждого показателя. Количественный состав групп



и соответствующие значения интеллекта и креативности приведены в таблице 1 (проверка межгрупповых различий выявила высокую степень их достоверности: $6,78 < t < 9,33$ при $p < 0,00001$).

Таблица 1 Состав выделенных для сравнительного анализа групп с высокими или низкими показателями интеллекта или креативности				
Показатель	Высокая оценка		Низкая оценка	
	n	значение	n	значение
Вербальный IQ	20	109,2 ± 3,3	17	100,0 ± 5,0
Зрительно-пространственный IQ	17	112,4 ± 4,6	20	100,9 ± 3,7
Оригинальность образной креативности	14	2,6 ± 0,6	23	4,9 ± 0,8

Согласно цели исследования с использованием однофакторного ANOVA для каждых 2-х независимых факторов: IQv1/IQv0, IQf1/IQf0 или НФ1/НФ0) были исследованы особенности активности фронтальных (Front) и центрально-париетальных (CPariet) областей коры для каждого частотного диапазона. Обнаруженные при анализе IQv или НФ эффекты представлены в табл. 2. Для IQf достоверных эффектов не выявлено.

На частоте дельта диапазона получен общий эффект для IQv: мощность этих низкочастотных колебаний во фронтальной коре была выше в группе IQv1, чем в группе IQv0. Аналогичный эффект: для фронтальных областей на уровне тенденции, а для центрально-париетальных – достоверно, отмечен при сравнении групп, различающихся уровнем образной оригинальности. В альфа диапазоне большие значения мощности ритмов в НФ1, чем в НФ0 имели регионарную специфику: для альфа1 достоверные различия были представлены в центральных областях коры, а для альфа2 – во фронтальных с доминированием правого полушария (Fz, F4, F8).

На частоте бета1 диапазона группы с высокими значениями IQv или образной оригинальности характеризовались более низкими значениями мощности по сравнению с группами IQv0 или НФ0 в левом переднефронтальном отведении с инверсией этого эффекта для всех остальных участков префронтальной коры (рис. 1). Такой же эффект асимметрии бета2 осцилляций во фронтальной коре выявлен и при сравнении групп НФ, но не для IQv (см. табл. 2).



Показатель	Частота	Область	F	df	p	Эффект
IQv	Дельта	Front	4,67	1,35	0,04	IQv1 > IQv0
НФ			3,53		0,07	НФ1 > НФ0
		CPariet	3,91		0,05	
НФ	Альфа1	CPariet	2,62	5,175	0,03	НФ1 > НФ0 в C3, Cz, C4
	Альфа2	Front	2,15	6,210	0,05	НФ1 > НФ0 в Fz, F4, F8
IQv	Бета1	Front	2,62	6,210	0,02	IQv0 > IQv1 в Fp1, но IQv1 > IQv0 в Fp2, F3, Fz, F4
НФ			2,78		0,01	Fp1: НФ0 > НФ1, Fp2, F3, Fz, F4: НФ1 > НФ0
НФ	Бета2	Front	2,50	6,210	0,03	Fp1: НФ0 > НФ1, Fz, F4: НФ1 > НФ0

Примечание: *Front* – фронтальные области коры, *CPariet* – центрально-париетальные

Таким образом, результаты дисперсионного анализа указывают на сходство связанных с вербальным интеллектом и с образной оригинальностью эффектов активации фронтальных областей коры в дельта и бета1 диапазонах. Вместе с этим, следует отметить, что связанные с креативностью изменения ЭЭГ представлены по сравнению с IQv более широко и регионарно (задние отделы коры), и частотно (альфа1,2 и бета2 диапазоны).

Для выяснения функциональной роли обнаруженных межгрупповых различий в фоновой мощности ЭЭГ был выполнен регрессионный анализ данных: в качестве независимой переменной рассматривали образную оригинальность или вербальный интеллект, зависимыми переменными были показатели мощности тех частотных диапазонов и тех отведений, которые были выявлены на предыдущем этапе анализа. Использовали линейную регрессию с пошаговым добавлением зависимых переменных.

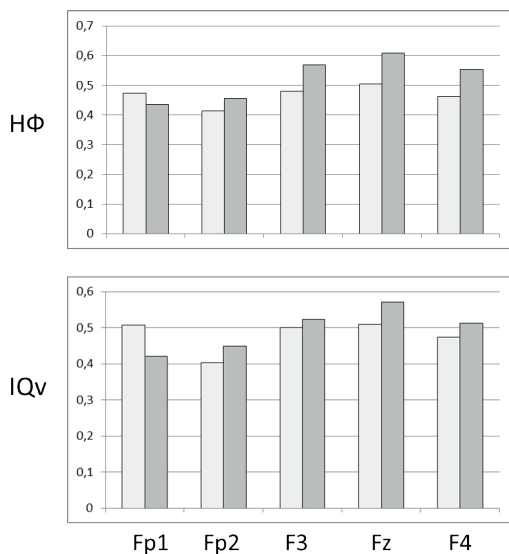


Рисунок 1. Регионарные особенности мощности бета1 ритма во фронтальных отведениях в зависимости от уровня образной оригинальности (НФ) и вербального интеллекта (IQv)

Для проверки отсутствия мультиколлинеарности показателей ЭЭГ был выполнен их корреляционный анализ. Обнаружены противоположные знаки корреляции мощности дельта и бета1,2 ритмов в переднефронтальных отведениях: положительные в НФ0 и отрицательные в НФ1 ($0,07 < p < 0,04$). При отсутствии принципиальных различий во взаимосвязи дельта и бета1 ритмов в других областях коры для групп НФ0 и НФ1 следует отметить более устойчивую связь дельта и бета2 ритма в группе НФ1 для фронтальных отделов коры по сравнению с НФ0 ($r = 0,63, p < 0,02$ и $r = 0,36, p < 0,1$, соответственно, при анализе средних значений мощности). Этот эффект более тесной связи дельта и бета2 ритма в НФ1 был представлен в отведениях F3, F7, F4, Cz, C3 ($0,52 < r < 0,61, 0,02 < p < 0,05$).

Что касается групп IQv, то при корреляционном анализе средних показателей мощности ритмов обнаружена достоверная связь дельта и бета2 ритмов в задней части коры для группы IQv1 без регионарной специфичности этого эффекта в зависимости от отведения. Для бета1 диапазона положительная связь ритмов в IQv0 представлена генерализованно по всем отведениям за исключением переднефронтальных; в группе IQv1 корреляции дельта и бета1 осцилляций достоверны только для парietальных областей и F3, F4, F8.



Полученные в результате регрессионного анализа показателей дельта и бета ритмов лучшие модели для НФ или IQv приведены в таблице 3. Коэффициент корреляции между выбранными зависимыми переменными: мощностью дельта и бета1 или бета2 ритма оказался ниже 0,27, что исключает эффект мультиколлинеарности зависимых переменных. Проверка вклада мощности альфа1,2 осцилляций не улучшила описательных возможностей регрессий для НФ.

Согласно полученным регрессионным моделям около 5 % дисперсии НФ может быть предсказано либо показателем средней мощности дельта ритма во фронтальных областях коры, либо ее значениями в отведениях F3 или F4. Добавление в регрессию показателей бета1 или бета2 ритма в переднефронтальном отведении левого полушария повышает описательные возможности регрессии (R^2 увеличивается до 16–17 %), однако отдельный вклад мощности высокочастотных колебаний не достигает значимого уровня (см. табл. 3).

Таблица 3

Основные параметры регрессионных моделей для показателей оригинальности (НФ) и вербального интеллекта (IQv)

Частота	Область	F	df	p_E	R^2	β	t	p_t
НФ								
Дельта	Front	4,04	1,35	0,05	0,10	0,32	2,01	0,05
	F3	4,29		0,05	0,11	0,33	2,07	0,05
	F4	4,11		0,05	0,10	0,32	2,03	0,05
Дельта	F3	3,57	2,34	0,04	0,17	0,41	2,50	0,02
Бета1	Fp1							
Дельта	F3	3,24		0,05	0,16	0,36	2,29	0,03
Бета2	Fp1							
IQv								
Дельта	Front	3,39	1,35	0,07	0,09	0,30	1,84	0,07
	F7	6,58		0,01	0,16	0,40	2,56	0,01
	Fp1	3,02		0,08	0,09	0,28	1,74	0,08
	Fp2	3,25		0,08	0,09	0,29	1,80	0,08
Дельта	F7	4,41	2,34	0,02	0,21	0,43	2,78	0,01
Бета1	Fp1							
Дельта	F7	5,14		0,01	0,23	0,41	2,70	0,01
Бета2	Fp1							



Регрессионные модели для IQv оказались подобны тем, что получены для НФ, за исключением замены отведения F3 на F7: мощность дельта ритма в отведении F7 предсказывает около 16 % вариабельности IQv. С введением в регрессию показателей бета мощности R^2 достигает 21–23 %, однако, так же как и в моделях для НФ, значимого уровня эти высокочастотные предикторы IQv не достигают ($0,08 < p < 0,16$).

Обсуждение результатов

Полученные в результате межгруппового сравнения эффекты согласуются с представлением, что интеллект (и структуры с ним связанные) является необходимым, но не достаточным условием креативности (Karwowski et al., 2016). Причем в качестве такого необходимого условия для образной креативности оказывается вербальный интеллект, что, по-видимому, обусловлено включением речевых функций не только в генерацию идей (Kenett et al., 2018), но и в организацию исполнительного контроля выполнения задания. Эти две составляющие креативности можно связать с разными осцилляторными компонентами фоновой активности коры: исполнительный контроль – с дельта активностью (Knyazev, 2007, 2012), а речевые функции – с бета1 (Pulvermuller, Birbaumer, Lutzenberger, & Mohr, 1997). Обнаруженное на альфа1,2 частоте повышение мощности биопотенциалов при высокой образной оригинальности соответствует представлениям о «преднастройке» фонового состояния мозга (Kounios et al., 2008), ведущей к дальнейшей реализации интернального внимания и процессов торможения при дивергентном мышлении (Benedek et al., 2011).

Более широкое представительство эффекта синхронизации дельта осцилляций в группе НФ1, чем в НФ0, охватывающей не только лобные, но и центрально-теменные участки коры, отражает потенциальные ресурсы подключения для креативной деятельности распределенной нейронной сети мультимодальной информации. Действительно, с использованием фМРТ показано взаимодействие фронтопариетальной системы и DMN как основы для генерации концептуально нового решения при тестировании образной креативности (Christensen, Benedek, Silvia, & Beaty, 2019). Для эффективной координации нейронных ансамблей этой распределенной системы требуется синхронизация медленноволновой активности согласно нашим данным и результатам другого исследования, в котором также отмечена положительная связь дельта колебаний и оригинальности дивергентного мышления (Boot, Baas, Mühlfeld, de Dreu, & van Gaal, 2017).

Подобие полученных моделей для НФ и IQv можно рассматривать как потенциальные возможности использования разных стратегий выполнения образной креативной задачи: и инсайтной, и аналитической, причем



дифференциация этих когнитивных стратегий возможна на основе бета осцилляций в фоновой ЭЭГ (Erickson et al., 2018), мощность которых является дополнительным предиктором дисперсии и НФ, и IQv согласно созданным регрессиям.

Устойчивый вклад в регрессионную модель и НФ, и IQv дельта биопотенциалов левых фронтальных областей может отражать способность к контролю дальнейшей когнитивной деятельности за счет мотивационного потенциала (Кнуязев, 2007) и координации активности пространственно распределенных нейронных сетей для поиска оригинального решения, как это было отмечено ранее (Bhattacharya & Petsche, 2005). Однако имеются данные и о противоположной реакции: более низком уровне дельта осцилляций при генерации уникального образа (Foster, Williamson, & Harrison, 2005). Возможно, такие противоречия отражают эффект субъективно оцениваемой сложности задачи и связанного с ним баланса активационных и тормозных процессов в коре (Разумникова, 2009а). Регионарная специфичность предикторов НФ или IQv (отведения Fp1, F3, F7) согласуется с данными, что левая часть дорзолатеральной префронтальной коры выполняет функции планирования целенаправленного поиска решения проблемы (Aziz-Zadeh et al., 2013), а показатель связности левой части фронтопариетальной системы и передней части DMN положительно коррелирует с оригинальностью решения дивергентной задачи (Shi et al., 2018).

Дополнительный вклад в модель бета ритма можно интерпретировать как часть управления воспроизведением образов с использованием ассоциативно-семантической сети при тестировании креативности. Причем отрицательный знак мощности бета1,2 ритма в левой переднефронтальной коре (отведение Fp1) может быть свидетельством негативной роли быстрого воспроизведения образа для завершения фигуры, так как предъявленный стимул вызывает в первую очередь воспоминание наиболее часто встречающихся, стереотипных объектов. В пользу этой гипотезы свидетельствуют данные о функциональном значении левых префронтальных областей в беглости генерации идей (Hirshorn & Thompson-Schill, 2006).

Заключение

Анализ фоновой активности фронтальных и центрально-париетальных областей коры в шести частотных диапазонах от дельта до бета2 выявил, что только мощность дельта и бета1 осцилляций является предиктором как невербальной креативности, так и вербального интеллекта. При сходных регрессионных моделях образной оригинальности и вербального компонента интеллекта, дифференциации лиц по уровню образной креативности сопутствуют также изменения в мощности альфа1, альфа2 и бета2 колебаний,



которые представлены не только во фронтальных, но и в центрально-париетальных отделах коры. Выделенные ЭЭГ корреляты вербального интеллекта и образной креативности свидетельствуют, что связь между интеллектом и креативностью опосредована фронтальной системой исполнительного контроля когнитивной деятельности.

Благодарности

Авторы выражают благодарность А. А. Яшаниной и Е. А. Хорошавцевой, принимавших участие в регистрации ЭЭГ.

Работа поддержана грантом РФФИ № 19-015-00412 «Возрастные особенности активации фронто-париетальной системы и полушарная специфика нейрофизиологических характеристик, соотносимых с образной творческой деятельностью».

Литература

- Дикая, Л. А. и Дикий, И. С. (2015). *Творческий мозг: монография*. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ.
- Нагорнова, Ж. В. (2007). Динамика мощности ЭЭГ при выполнении заданий на невербальную (образную) креативность. *Физиология человека*, 33(3), 26–34.
- Разумникова, О. М. (2002). *Способы определения креативности*. Новосибирск: Изд-во НГТУ.
- Разумникова, О. М. (2009а). Особенности селекции информации при креативном мышлении. *Психология. Журнал Высшей школы экономики*, 6(3), 134–161. doi: 10.17323/1813-8918-2009-3-134-161
- Разумникова, О. М. (2009б). Связь частотно-пространственных параметров фоновой ЭЭГ с уровнем интеллекта и креативности. *Журнал высшей нервной деятельности*, 59(6), 686–695.
- Arden, R., Chavez, R. S., Grazioplene, R., & Jung, R. E. (2010). Neuroimaging creativity: A psychometric view. *Behavioural Brain Research*, 214(2), 143–156. doi: 10.1016/j.bbr.2010.05.015
- Aziz-Zadeh, L., Liew, S. L., & Dandekar, F. (2013). Exploring the neural correlates of visual creativity. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 8, 475–480. doi: 10.1093/scan/nss021
- Beaty, R. E., Benedek, M., Wilkins, R. W., & Jauk, E. (2014). Creativity and the default network: A functional connectivity analysis of the creative brain at rest. *Neuropsychologia*, 64, 92–98. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2014.09.019
- Beaty, R. E., Seli, P., & Schacter, D. L. (2019). Network Neuroscience of Creative Cognition: Mapping Cognitive Mechanisms and Individual Differences in the Creative Brain. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 22–30. doi: 10.1016/j.cobeha.2018.08.013



- Benedek, M., Bergner, S., Könen, T., Fink, A., & Neubauer, A. C. (2011). EEG alpha synchronization is related to top-down processing in convergent and divergent thinking. *Neuropsychologia*, *49*, 3505–3511. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2011.09.004
- Benedek, M., Jauk, E., Sommer, M., Arendasy, M., & Neubauer, A. C. (2014). Intelligence, creativity, and cognitive control: The common and differential involvement of executive functions in intelligence and creativity. *Intelligence*, *46*, 73–83. doi: 10.1016/j.intell.2014.05.007
- Bhattacharya, J., & Petsche, H. (2005). Drawing on mind's canvas: Differences in cortical integration patterns between artists and non-artists. *Human Brain Mapping*, *26*(1), 1–14. doi: 10.1002/hbm.20104
- Boot, N., Baas, M., Mühlfeld, E., de Dreu, C. K. W., & van Gaal, S. (2017). Widespread neural oscillations in the delta band dissociate rule convergence from rule divergence during creative idea generation. *Neuropsychologia*, *104*, 8–17. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2017.07.033
- Christensen, A. P., Benedek, M., Silvia, P., & Beaty, R. (2019). Executive and default network connectivity reflects conceptual interference during creative imagery generation. *PsyArXiv Preprints*. doi: 10.31234/osf.io/n438d
- Erickson, B., Truelove-Hill, M., Oh, Y., Anderson, J., Zhang, F. Z., & Kounios, J. (2018). Resting-state brain oscillations predict trait-like cognitive styles. *Neuropsychologia*, *120*, 1–8. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2018.09.014
- Fink, A., & Benedek, M. (2014). EEG alpha power and creative ideation. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *44*, 111–123. doi: 10.1016/j.neubiorev.2012.12.002
- Foster, P. S., Williamson, J. B., & Harrison, D. W. (2005). The ruff figural fluency test: heightened right frontal lobe delta activity as a function of performance. *Archives of Clinical Neuropsychology*, *20*, 427–434. doi: 10.1016/j.acn.2004.09.010
- Gulbinaite, R., van Rijn, H., & Cohen, M. X. (2014). Fronto-parietal network oscillations reveal relationship between working memory capacity and cognitive control. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*(761). doi: 10.3389/fnhum.2014.00761
- Hahn, J., Kim, K. K., Park, S. H., & Lee, H. M. (2017). Brain areas subserving Torrance tests of creative thinking: an functional magnetic resonance imaging study. *Dementia and Neurocognitive Disorders*, *16*(2), 48–53 doi: 10.12779/dnd.2017.16.2.48
- Hearne, L. J., Mattingley, J. B., & Cocchi, L. (2016). Functional brain networks related to individual differences in human intelligence at rest. *Scientific Reports*, *6*(32328). doi: 10.1038/srep32328
- Heinonen, J., Numminen, J., Hlushchuk, Y., Antell, H., Taatila, V., & Suomala, J. (2016). Default Mode and Executive Networks Areas: Association with the Serial Order in Divergent Thinking. *PLoS ONE*, *11*(9), e0162234. doi: 10.1371/journal.pone.0162234



- Herrmann, C. S., Strüber, D., Helfrich, R. F., & Engel, A. K. (2016). EEG oscillations: From correlation to causality. *International Journal of Psychophysiology*, *103*, 12–21. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2015.02.003
- Hirshorn, E. A., & Thompson-Schill, S. L. (2006). Role of the left inferior frontal gyrus in covert word retrieval: neural correlates of switching during verbal fluency. *Neuropsychologia*, *44*(12), 2547–2557. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2006.03.035
- Jauk, E., Benedek, M., Dunst, B., & Neubauer, A. C. (2013). The relationship between intelligence and creativity: New support for the threshold hypothesis by means of empirical breakpoint detection. *Intelligence*, *41*, 212–221. doi: 10.1016/j.intell.2013.03.003
- Jung, R. E., & Haier, R. J. (2007). The Parieto-Frontal Integration Theory (P-FIT) of intelligence: converging neuroimaging evidence. *Behavioral and Brain Sciences*, *30*(2), 135–154. doi: 10.1017/S0140525X07001185
- Jung, R. E., Mead, B. S., Carrasco, J., & Flores, R. A. (2013). The structure of creative cognition in the human brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*, 330. doi: 10.3389/fnhum.2013.00330
- Karwowski, M., Dul, J., Gralewski, J., Jauk, E., Jankowska, D. M., Gajda, A., ... Benedek, M. (2016). Is creativity without intelligence possible? A Necessary Condition Analysis. *Intelligence*, *57*, 105–117. doi: 10.1016/j.intell.2016.04.006
- Kenett, Y. N., Medaglia, J. D., Beaty, R. E., Chen, Q., Betzel, R. F., Thompson-Schill, S. L., & Qiu, J. (2018). Driving the brain towards creativity and intelligence: A network control theory analysis. *Neuropsychologia*, *118*(PtA), 79–90. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2018.01.001
- Knyazev, G. G. (2007). Motivation, emotion, and their inhibitory control mirrored in brain oscillations. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *31*(3), 377–395. doi: 10.1016/j.neubiorev.2006.10.004
- Knyazev, G. G. (2012). EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *36*(1), 677–695. doi: 10.1016/j.neubiorev.2011.10.002
- Kounios, J., Fleck, J. I., Green, D. L., Payne, L., Stevenson, J. L., Bowden, E. M., & Jung-Beeman, M. (2008). The origins of insight in resting-state brain activity. *Neuropsychologia*, *46*, 281–291. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2007.07.013
- Lee, K. H., Choi, Y. Y., Gray, J. R., Cho, S. H., Chae, J. H., Lee, S., & Kim, K. (2006). Neural correlates of superior intelligence: Stronger recruitment of posterior parietal cortex. *NeuroImage*, *29*, 578–586. doi: 10.1016/j.neuroimage.2005.07.036
- Li, W., Yang, J., Zhang, Q., Li, G., & Qiu, J. (2016). The Association between Resting Functional Connectivity and Visual Creativity. *Scientific Reports*, *6*(25395). doi: 10.1038/srep25395
- Lustenberger, C., Boyle, M. R., Foulser, A. A., Mellin, J. M., & Fröhlich, F. (2015).



- Functional role of frontal alpha oscillations in creativity. *Cortex*, 67, 74–82. doi: 10.1016/j.cortex.2015.03.012
- Nusbaum, E. C., & Silvia, P. J. (2011). Are intelligence and creativity really so different? Fluid intelligence, executive processes, and strategy use in divergent thinking. *Intelligence*, 39, 36–45.
- Pamplona, G. S. P., Neto, G. S. S., Rosset, S. R. E., Rogers, B. P., & Salmon, C. E. G. (2015). Analyzing the association between functional connectivity of the brain and intellectual performance. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 1–11. doi: 10.3389/fnhum.2015.00061
- Pidgeon, L. M., Grealy, M., Duffy, A. H., Hay, L., McTeague, C., Vuletic, T., ... Gilbert, S. J. (2016). Functional neuroimaging of visual creativity: a systematic review and meta-analysis. *Brain and Behavior*, 6, e00540. doi: 10.1002/brb3.540
- Preckel, F., Holling, H., & Wiese, M. (2006). Relationship of intelligence and creativity in gifted and non-gifted students: An investigation of threshold theory. *Personality and Individual Differences*, 40, 159–170. doi: 10.1016/j.paid.2005.06.022
- Pulvermuller, F., Birbaumer, N., Lutzenverger, W., & Mohr, B. (1997). High-frequency brain activity: Its possible role in attention, perception and language processing. *Progress in Neurobiology*, 52, 427–445.
- Razumnikova, O. M. (2007). The functional significance of α_2 frequency range for convergent and divergent verbal thinking. *Human Physiology*, 33(2), 146–156. doi: 10.1134/S036211970702003X
- Shi, L., Sun, J., Xia, Y., Ren, Z., Chen, Q., Wei, D., ... Qiu, J. (2018). Large-scale brain network connectivity underlying creativity in resting-state and task fMRI: Cooperation between default network and frontal-parietal network. *Biological Psychology*, 135, 102–111. doi: 10.1016/j.biopsycho.2018.03.005
- Solomon, E. A., Kragel, J. E., Sperling, M. R., Sharan, A., Worrell, G., Kucewicz, M., ... Kahana, M. J. (2017). Widespread theta synchrony and high-frequency desynchronization underlies enhanced cognition. *Nature Communications*, 8(1704). doi: 10.1038/s41467-017-01763-2
- Stevens, C. E. J., & Zabelina, D. L. (2019). Creativity comes in waves: An EEG-focused exploration of the creative brain. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 154–162. doi: 10.31234/osf.io/ke6wq
- Takeshi, O., Aihara, T., Shimokawa, T., & Yamashita, O. (2018). Large-scale brain network associated with creative insight: combined voxel-based morphometry and resting-state functional connectivity analyses. *Scientific Reports*, 8(6477). doi: 10.1038/s41598-018-24981-0