

УДК 612.821+159.95

ФРОНТО-ПАРИЕТАЛЬНЫЕ ПАТТЕРНЫ ДЕЛЬТА- И БЕТА-ОСЦИЛЛЯЦИЙ ЭЭГ КАК МАРКЕРЫ СТРАТЕГИЙ КРЕАТИВНОСТИ

© 2023 г. О. М. Разумникова*

ФГБОУ ВО Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия

*E-mail: razoum@mail.ru

Поступила в редакцию 18.11.2022 г.

После доработки 04.02.2023 г.

Принята к публикации 06.02.2023 г.

Механизму кооперации фронто-париетальной системы и дефолт-системы уделяется в последнее время много внимания, так как их “преднастройка” в покое и последующая динамика функционального взаимодействия связывается с индивидуальным разнообразием стратегий выполнения заданий при тестировании креативности. Для исследования ЭЭГ-коррелятов таких стратегий выполнен анализ регионарных особенностей Δ - и β -осцилляций в фоне и их сопоставление с результатами предварительного выполненного тестирования креативности и интеллекта у 37 студентов университета (18 ± 1.1 лет; 27 девушек и 10 юношей). Показатели оригинальности ответов при тестировании креативности вычисляли с использованием созданных авторами ранее баз данных для субтестов “Круги”, “Незавершенные фигуры”, “Необычное использование обычных предметов” и экспертной оценки оригинальности предложений, составленных из слов, относящихся к отдаленным семантическим категориям. Вербальный и образный компоненты интеллекта оценивали согласно субтестам структуры интеллекта Амтхауэра. С использованием кластерного анализа перечисленных показателей креативности и интеллекта были выделены две группы участников исследования: одна ($ГР_{KIQ}$) характеризовалась сочетанием более высоких значений интеллекта и оригинальности ответов в тех заданиях, где требовался отказ от стереотипных идей при ограничении времени их поиска, а другая ($ГР_K$) — сравнительно более низким интеллектом, но высокой оригинальностью решения проблемы в условиях тестирования креативности с разнообразием стимулов и без временных ограничений. Эти две группы отличались регионарной организацией мощности Δ - и β_2 -ритмов и паттернами корреляций этих ритмов: $ГР_{KIQ}$ представлена генерализованной высокочастотной β -активностью и характеризуется корреляционной взаимосвязью с низкочастотными биопотенциалами лобной коры, $ГР_K$ — представлена более дифференцированной по отведениям β_2 -активностью при ее диффузно распределенной связи с Δ -ритмом с исключением передне-фронтальных областей. Обнаруженные эффекты можно рассматривать как “преднастройку” к стратегии “интеллектуального” поиска оригинального ответа в условиях сопротивления фиксации на стереотипной идее в $ГР_{KIQ}$ или к решениям на основе спонтанного поиска отдаленных ассоциаций в $ГР_K$.

Ключевые слова: креативность, интеллект, ЭЭГ, фронто-париетальная система, дефолт-система, Δ - и β -осцилляции.

DOI: 10.31857/S013116462260094X, **EDN:** GISIRV

Интенсивные нейрофизиологические исследования креативности, развернувшиеся в последнее время, сосредотачиваются на выяснении закономерностей когнитивных процессов, лежащих в основе механизмов поиска оригинального решения проблемы, в том числе значения интеллекта и исполнительного контроля при решении поставленной задачи или вклада инсайтной стратегии [1–5]. Единого мнения в понимании взаимосвязи креативности и интеллекта, до сих пор, не достигнуто, по-видимому, в связи с тем, что эти психометрические конструкторы представляют сложный комплекс ментальных операций: вни-

мание, память, воображение, формирование ассоциаций, в разной степени используемые при решении поставленных экспериментальных задач. Исследования взаимодействия креативности и интеллекта, преимущественно с применением томографических методов в последние годы, свидетельствуют об их общих структурных элементах в нейронной архитектуре мозга [5], а психометрические данные — о функциональном сходстве процессов селекции информации [4]. Остается, однако, не ясным, это сходство обеспечивается за счет генерализованных или специфических нейронных систем, требуемых для выполнения экс-

периментальных заданий вербальной или образной природы. Поэтому остаются актуальными вопросы: является ли креативность компонентом интеллекта, или, напротив, интеллект включен в структуру креативности, или креативность и интеллект связаны за счет общих нейронных механизмов селекции информации и использования ресурсов памяти.

Наряду с данными о широком представительстве структур мозга в ассоциации и с креативностью [6–11], и с интеллектом [12–16], имеются доказательства того, что связь этих когнитивных конструкторов опирается преимущественно на взаимодействие фронтальных исполнительных областей и задних регионов коры или систем *FPN* (*fronto-parietal network*) и “системы мозга по умолчанию” – *DMN* (*default mode network*) [5, 6, 16]. Причем исполнительный контроль внимания рассматривается как фактор, регулирующий вклад флюидного интеллекта и “блуждания мысли” (*mindwandering*) в креативное мышление, имеющих на разных его этапах и позитивное, и негативное значение [5].

Механизмам кооперации *FPN* и *DMN* уделяется в последнее время много внимания, так как их “преднастройка” в покое и динамика функционального взаимодействия связывается с индивидуальным разнообразием стратегий выполнения заданий при тестировании как вербальной, так и образной креативности [3, 17]. Например, показано, что *FPN* является медиатором связи вербальной креативности с активностью передней *DMN*, а визуальной креативности – ее задней части [17]. Усиление вклада *FPN* отражает доминирование исполнительного контроля в поиске новых решений проблемы, а *DMN* – спонтанную генерацию идей [6, 7, 18]. Согласно данным разных авторов, креативное мышление сопровождается динамичной реорганизацией этих систем с регионарным расширением функциональных нейронных сетей, включая левую среднюю височную извилину и слуховую систему для вербальной креативности [19] или височно-теменные и префронтальные области для образной креативности [20]. Причем в последнем случае специфика подключения отдельных областей указанных регионов коры определялась факторами, сформированными из разных показателей креативности: фактор, включающий беглость и оригинальность, был положительно связан с объемом мозга в структурах, близких к *DMN*, а фактор, объединяющий показатели разработанности рисунка и сопротивления фиксации ассоциирован с лобно-височными областями.

В процессе накопления данных первоначальное представление о доминировании правого полушария при решении экспериментальных творческих заданий [21] изменилось, так как участие

левой дорзолатеральной префронтальной коры [22] или левой передней цингулярной коры [20] показано, например, при тестировании невербальной креативности; более того, латеральные изменения показателя функциональной связности в дорзолатеральной префронтальной коре, ассоциированной с невербальной креативностью, оказываются зависимы от активности *FPN* и *DMN* [23]. Вместе с этим, появились новые доказательства ключевого значения функций правой фронтальной области коры для успешности дивергентного мышления, которые были получены на основе анализа разных компонентов интеллекта: флюидного, кристаллизованного (для тестирования которого использовались вербальные задания) и зрительно-пространственного [5]. Следовательно, для понимания закономерностей формирования разных функциональных нейронных систем, обеспечивающих разные формы креативности, и особенностей их реорганизации в зависимости от структуры интеллекта требуются дальнейшие исследования.

Для изучения функционального значения фонового состояния мозга используются не только его томографические, но и энцефалографические характеристики [1, 23–25]. Среди разных частотных диапазонов ЭЭГ чаще других рассматривается синхронизация/десинхронизация α -колебаний, что обусловлено их информативностью в отношении специфики процессов торможения/активации в нейронных сетях, отражающей и креативность, и интеллект (*IQ*) [1, 26–28]. Показано, что вариативность флюидного *IQ* связана с обновлением рабочей памяти, тогда как предикторами креативности является не только этот компонент исполнительной системы, но и тормозные функции [27]. Баланс фоновой активности фронтальных и задних отделов коры может отражать индивидуальный стиль решения проблемы, в том числе предпочтение инсайтной или аналитической стратегии [2, 27, 29, 30], причем в качестве индикаторов такого баланса рассматриваются не только α , но и низкочастотные Δ -, θ - и высокочастотные β -осцилляции [18, 24, 31–33]. Δ -ритм представляет интерес для анализа креативности, так как увеличение его мощности отражает подавление усвоенного доминантного поведения и указывает на эффективность нового обучения, а θ - и β -осцилляции рассматриваются как энцефалографические корреляты обработки информации за счет функций *DMN* и *FPC* [31, 34].

Ранее нами было показано усиление взаимодействия нейронных ансамблей передних областей коры с задними отделами левого полушария у лиц, характеризующихся сравнительно высокими показателями интеллекта и креативности по сравнению с теми, кто обладал их меньшими значениями [1]. В дальнейшем было установлено, что фронтальные Δ - и β -ритмы могут служить

Таблица 1. Результаты описательной статистики для показателей интеллекта и креативности

Показатель	Среднее	SD	Минимум	Максимум
Интеллект				
Вербальный (IQ_v)	105.3	6.2	90.5	114.5
Образный (IQ_s)	105.9	6.9	90.5	124.0
Оригинальность				
Круги (Ок)	1.2	1.2	0.1	5.8
Незавершенные фигуры (Онф)	3.4	1.4	0.8	7.1
Необычное использование (Они)	1.4	1.2	0.1	4.7
Составление предложений (Осп)	3.7	2.4	0.0	9.8

Примечание: IQ_v – вербальный компонент интеллекта, IQ_s – зрительно-пространственный компонент интеллекта, Ок – показатель оригинальности при выполнении субтеста “Круги”, Онф – показатель оригинальности при выполнении субтеста “Незавершенные фигуры”, Они – показатель оригинальности при выполнении субтеста “Необычное использование”, Осп – показатель оригинальности при выполнении субтеста “Составление предложения”.

предикторами как невербальной креативности, так и вербального интеллекта [32]. Целью настоящего исследования стало выяснение регионарных особенностей паттернов Δ - и β -ритмов, как “преднастройки” для реализации вербальной или невербальной творческой деятельности и ее потенциальной связи со значениями вербальных и зрительно-пространственных компонентов интеллекта.

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 37 чел. (студенты 18 ± 1.1 лет; 27 девушек и 10 юношей).

Для определения вербального и образного (зрительно-пространственного) компонентов интеллекта использовали тест структуры интеллекта Амтхауэра: средние значения выполнения двух вербальных (субтесты 2 и 3) (IQ_v) и двух невербальных зрительно-пространственных заданий (субтесты 7 и 8) (IQ_s). Для оценки невербальной образной креативности применяли субтесты Торренса “Круги” и “Незавершенные фигуры”, вербальной – методику Гилфорда “Необычное использование обычного предмета” и составление осмысленного предложения с включением трех слов-стимулов (существительных из отдаленных семантических категорий). Показатели оригинальности ответов при выполнении трех первых методик вычисляли на основе соответствующей базы данных как число, обратное количеству таких же идей [35]. Оригинальность предложений оценивали трое подготовленных экспертов, имеющие опыт работы с данной методикой (α Кронбаха для полученных оценок составила 0.82).

Регистрацию ЭЭГ в состоянии спокойного бодрствования с закрытыми глазами выполняли с помощью аппаратуры и программного обеспечения “Мицар-201” (Россия) в 19-ти отведениях (Fp_1 , Fp_2 , F_7 , F_3 , F_z , F_4 , F_8 , T_3 , C_3 , C_z , C_4 , T_4 , T_5 , P_3 ,

P_z , P_4 , T_6 , O_1 , O_2), расположенных согласно системе 10/20, с объединенным референтным ушным электродом, заземляющий электрод в отведении Fp_z . Сопротивление электродов менее 5 кОм. Режекторный фильтр 50/60 Гц, параметры фильтров верхних (ФВЧ) и нижних (ФНЧ) частот, соответственно, 0.53 и 50 Гц. Для анализа активности мозга выбирали 2-секундные безартефактные отрезки ЭЭГ с перекрытием в 50% общей длительностью 60 с. Частота дискретизации 250 Гц. Для каждого отведения методом быстрого преобразования Фурье вычисляли спектральную плотность ЭЭГ в шести частотных диапазонах: Δ (1–4 Гц), θ (4–7 Гц), α_1 (7–10 Гц), α_2 (10–13 Гц), β_1 (13–20 Гц) и β_2 (20–30 Гц). Для статистического анализа использовали натуральный логарифм значений мощности ЭЭГ в Δ - и β_2 -диапазонах согласно поставленной цели исследования.

Статистический анализ данных выполняли с применением лицензионного пакета программ Statistica 13. 3 (SN: JPBZ912J057923CNET2ACD-K).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 1 приведены полученные результаты тестирования показателей интеллекта и креативности.

Кластерная организация показателей креативности и интеллекта. На первом этапе анализа данных для исследования организации показателей креативности и интеллекта был использован иерархический агломеративный метод кластеризации предварительно нормализованных данных (нормализация выполнялась делением на среднее значение). После опробования разных методов оказалось, что лучшее разделение кластеров происходит с применением метода Уорда с евклидовой метрикой (рис. 1). Сходную структуру кластеров, объединяющих показатели интеллекта и креатив-

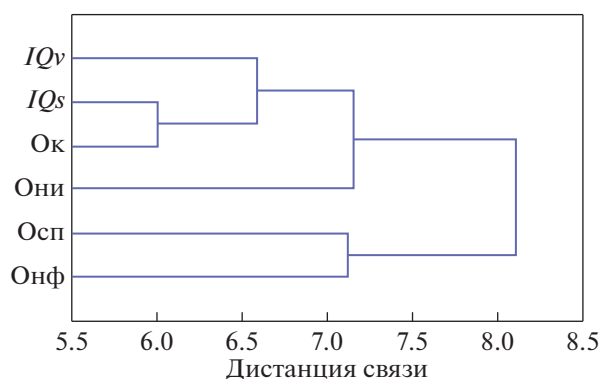


Рис. 1. Дендрограмма мер близости показателей вербальных и невербальных компонентов интеллекта и креативности согласно кластеризации Уорда.

IQv — вербальный компонент интеллекта, *IQs* — зрительно-пространственный компонент интеллекта, *Ок* — показатель оригинальности при выполнении субтеста “Круги”, *Они* — показатель оригинальности при выполнении субтеста “Необычное использование”, *Онф* — показатель оригинальности при выполнении субтеста “Незавершенные фигуры”, *Осп* — показатель оригинальности при выполнении субтеста “Составление предложения”.

ности, дает применение метода полных связей, основанного на определении максимальных значений парных расстояний между объектами в разных кластерах. Так как алгоритм Уорда основан на определении минимума дисперсий в гипотетических кластерах, то сформированную иерархическую структуру показателей интеллекта и креативности можно считать оптимально устойчивой для интерпретации полученных результатов.

Приведенная на рис. 1 структура кластеров свидетельствует о наиболее тесной связи *IQs* и образной оригинальности при выполнении субтеста “Круги”, и объединении этого кластера вместе с *IQv* и показателем вербальной оригинальности при “необычном использовании обычного предмета” в общий кластер (кластер 1). Показатели оригинальности ответов при выполнении двух других субтестов “Незавершенные фигуры” и “Составление предложения” формируют отдельный от первой группы переменных кластер, что указывает на другую стратегию поиска решения поставленной задачи (кластер 2).

Для дальнейшего анализа ЭЭГ-данных были сформированы выборки с использованием кластеризации показателей интеллекта и креативности методом *K-Means*, который позволил разделить две группы, различающиеся значениями рассмотренных показателей. Состав этих групп был скорректирован на основании результатов иерархической кластеризации: $ГР_{КИQ}$ составили лица, продемонстрировавшие сравнительно высокие показатели по субтестам “Круги” и “Необычное использование обычного предмета” (вошедшие в кластер 1), а $ГР_K$ — “Незавершенные фигуры” и “Составление предложения” (вошедшие в кластер 2).

В результате дисперсионного анализа всех показателей креативности обнаружен эффект фактора ГРУППА ($F_{5,166} = 6.85$; $p < 0.0001$; $\eta^2 = 0.17$). Двухфакторный *ANOVA* с независимыми переменными ПОЛ (2) и ГРУППА (2), выполненный для каждого показателя интеллекта и креативности, выявил влияние только фактора ГРУППА ($2.69 < F_{1,33} < 12.5$, $0.001 < p < 0.1$) с более высокими значениями *IQ*, *Ок* и *Они* в $ГР_{КИQ}$ при сравнительно низких значениях *IQ*, но более высоких показателях *Онф* и *Осп* в $ГР_K$ (табл. 2).

Таким образом, целью дальнейшего анализа было выяснение ЭЭГ-коррелятов креативности, различающейся в группах, сформированных согласно выделенным разным стратегиям поиска решения проблемы. При этом мы ограничились анализом только Δ - и β -ритмов, так как ранее было показано их информативное значение в качестве предикторов невербальной креативности и вербального интеллекта [32].

Кластерная организация Δ - и β_2 -ритма в группах, различающихся структурой креативности и интеллекта. Для выяснения особенностей частотно-пространственной организации низко- и высокочастотных осцилляций в выделенных группах: $ГР_{КИQ}$ и $ГР_K$ также был использован иерархический агломеративный метод кластеризации Уорда с евклидовой метрикой. На рис. 2 показаны полученные для этих групп дендрограммы сформированных кластеров для Δ -ритма, а на рис. 3 — для β_2 .

Таблица 2. Количественный состав и нормализованные показатели интеллекта и креативности в двух группах, сформированных на основе результатов кластерного анализа данных методом *K-Means*

Группа	<i>n</i>	<i>M (n)</i>	<i>Ж (n)</i>	<i>IQv</i>	<i>IQs</i>	<i>Ок</i>	<i>Они</i>	<i>Онф</i>	<i>Осп</i>
$ГР_{K+IQ}$	17	5	12	0.51	0.39	0.47	0.36	−0.26	−0.35
$ГР_K$	20	5	15	−0.33	−0.27	−0.33	−0.35	0.19	0.39
<i>p</i>	н/д	н/д	н/д	0.02	0.05	0.001	0.02	0.10	0.01

Примечание: *n* — общее количество участников исследования, *M (n)* — количество мужчин, *Ж (n)* — количество женщин. Остальные обозначения см. табл. 1.

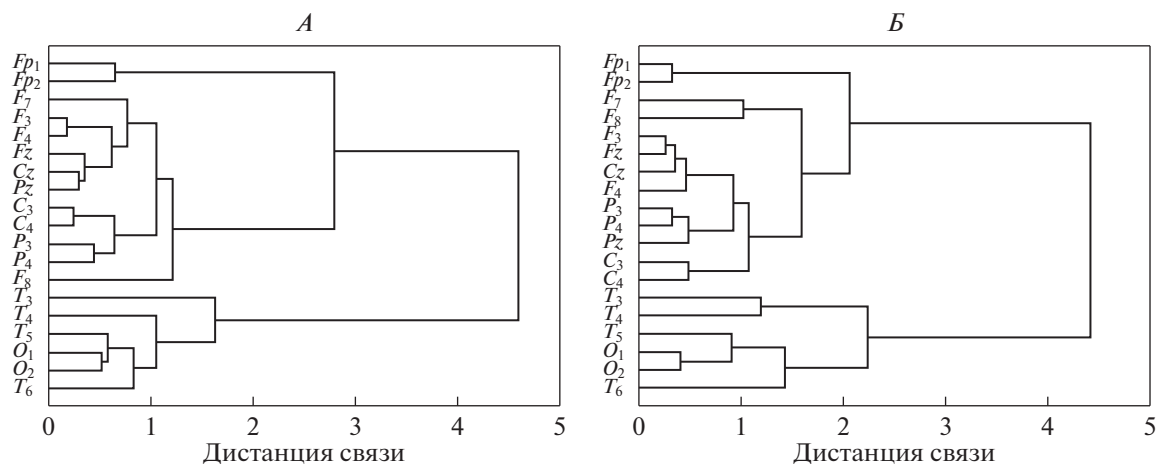


Рис. 2. Дендрограммы кластеров Δ -ритма, сформированных с применением метода Уорда и представляющих группы, различающиеся организацией креативности: связанной с интеллектом (А) и несвязанной с интеллектом (Б).

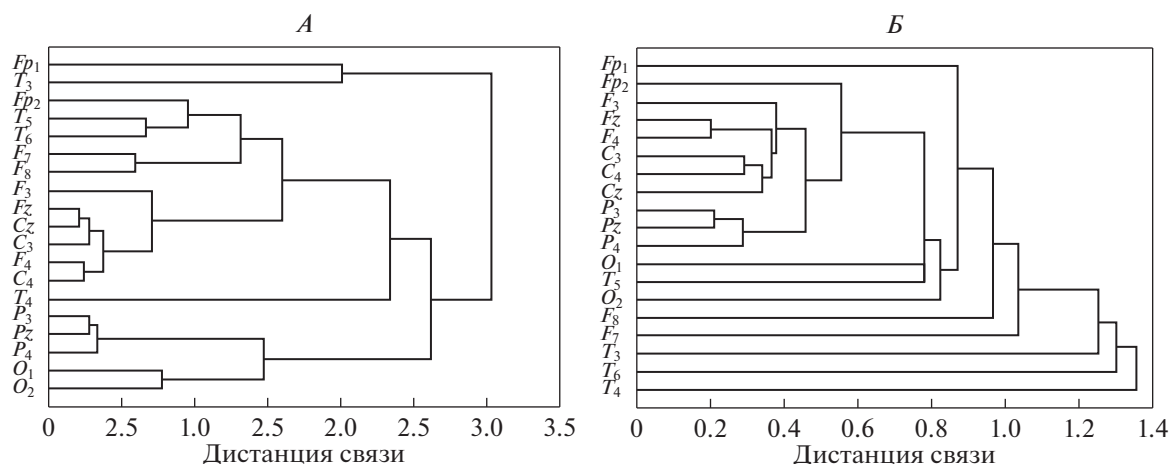


Рис. 3. Дендрограммы кластеров β_2 -ритма, сформированных с применением метода Уорда и представляющих группы, различающиеся организацией креативности: связанной с интеллектом (А) и несвязанной с интеллектом (Б).

Согласно кластерной организации Δ -ритма в обеих группах выделено по два кластера, однако ГР_{КИО} характеризуется большей дистанцией кластера, представляющего передние области коры при ведущем значении осцилляций в F_8 , тогда как в ГР_К полученные кластеры сходны по мере связности, а в объединении областей передней части коры ведущее значение принадлежит F_7 и F_8 (рис. 2) (специфика включения этих отведений в выделенные для ГР_{КИО} и ГР_К кластеры была доказана дополнительно выполненным кластерным анализом Δ -ритма только для передней части коры).

Регионарная организация β_2 -ритма представлена 2 кластерами в ГР_{КИО} (Fp_1 и Fp_2 формируют один кластер, остальные отведения – второй) и 4 кластерами в ГР_К (отведения T_3 , T_6 и T_4 отражают три отдельных кластера, а все остальные отве-

дения включены в другой, общий для них кластер) (рис. 3). При этом ведущую роль в объединении двух кластеров β -ритма в ГР_{КИО} имеет область, представленная T_4 , а в ГР_К – F_7 , F_8 и Fp_1 .

Для выяснения степени взаимодействия высокочастотных β_2 и низкочастотных Δ биопотенциалов в ГР_{КИО} и ГР_К был выполнен корреляционный анализ, результаты которого показаны на рис. 4 ($0.50 < r < 0.63$ при $0.008 < p < 0.05$; вертикально приведены отведения для Δ -ритма, горизонтально – для β_2).

Полученные результаты указывают на то, что различия между группами представлены более выраженными связями между Δ -ритмом в лобных участках коры и β_2 -осцилляциями в задних областях коры для ГР_{КИО} (рис. 4, А), тогда как ГР_К характеризуется более широко распределенными

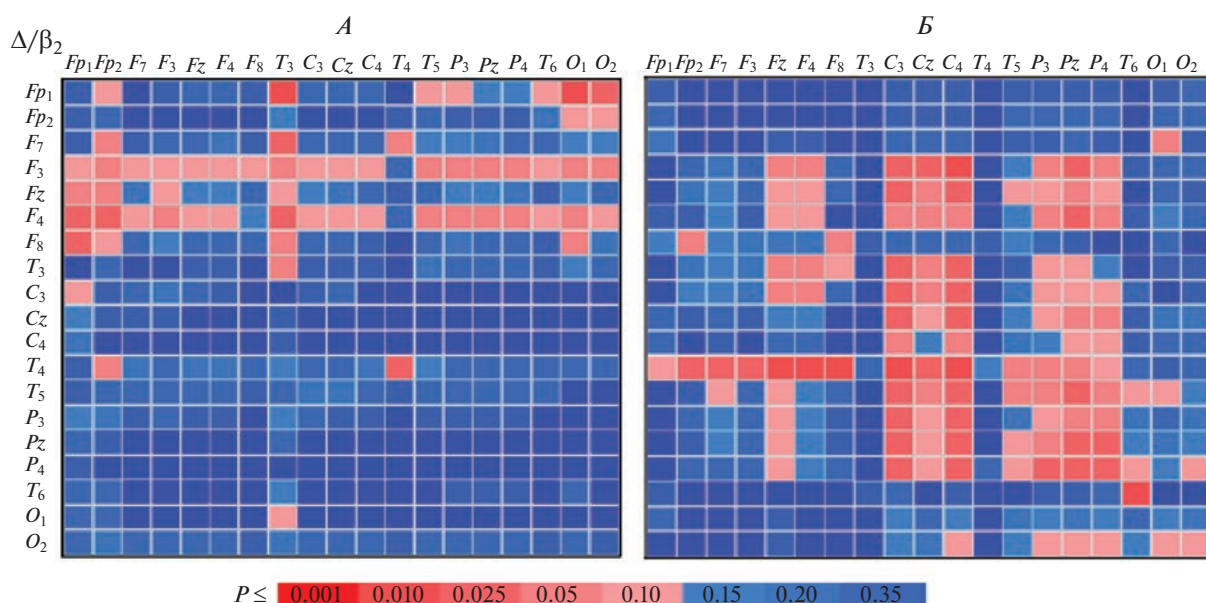


Рис. 4. Корреляционные карты между Δ (отведения по вертикали)- и β_2 (отведения по горизонтали)-ритмами для групп, различающихся организацией креативности: связанной с интеллектом (ГР_{КИО}, А) и несвязанной с интеллектом (ГР_К, Б).

корреляциями β_2 - и Δ -ритма с концентрацией в центрально-париетальных областях коры (рис. 4, Б).

Таким образом, можно заключить, что две выделенные группы участников исследования, различающиеся уровнем интеллекта и оригинальностью ответов при выполнении заданий, требующих отказа от стереотипных идей (ГР_{КИО}), или решения проблемы в условиях заданного разнообразия стимулов (ГР_К), характеризуются разными формами регионарной организации Δ - и β_2 -ритмов и их взаимосвязи. В ГР_{КИО} выделены по два кластера в каждом частотном диапазоне, представляющие разные формы объединения передних и задних отделов коры, отраженные во взаимосвязи низкочастотных биопотенциалов лобной коры и генерализованно представленной высокочастотной активности β -активности. ГР_К отличается регионарно более дифференцированно представленной кластеризацией β_2 -активности при ее диффузно распределенной связи с Δ -ритмом с исключением передне-фронтальных областей.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты указывают, что сам стимульный материал, невзирая на общую инструкцию “быть оригинальным”, определяет стратегию поиска решения задачи и даже в большей степени, чем ее вербальная или образная природа. Повторяющиеся стимулы (круги или обычный предмет) способствуют, в первую очередь, генерации стереотипных ответов. Поэтому для отказа

от них и продолжения поиска с критической оценкой, всплывающих при поиске идей, требуется такая “преднастройка” фоновой активности мозга, в которой задействованы префронтальные области коры (рис. 2, 3, 4, А). Это состояние характеризуется сочетанием показателей оригинальности и IQ (рис. 1). В условиях тестирования креативности с применением разнообразных стимулов, относящихся к разным семантическим категориям, для успешного выполнения задания предпочтительна стратегия поиска ответа в широко представленной сети ассоциаций, что отражается доминированием диффузно связанных областей задних отделов коры (рис. 3, 4 Б). Повидимому, такую функциональную связность разных регионов коры обеспечивает синхронизация нейронных сетей на частотах Δ - и β -диапазонов: с доминированием префронтальных областей в случае склонности к стратегии критически обусловленного отказа от стереотипа, но темпоро-париетально-окципитальных областей — при задании стимулов, вызывающих актуализацию отдаленных ассоциаций. Можно также отметить, что в последнем случае наблюдается сравнительно больший эффект синхронизации амплитуды Δ - и β_2 -ритма в отведениях правого полушария (T_4, O_2), тогда как в первом случае — левого (Fp_1, F_7). То есть обнаруженный эффект смены полушарной доминантности, связанной с креативностью [20–22], можно объяснить индивидуальными предпочтениями в использовании стратегий “интеллектуальной” или “спонтанной” реализации дивергентного мышления, сопровождающейся

смещением активности в *FPN* и *DMN* при решении задачи [23]. Полученные результаты свидетельствуют о значении фонового состояния *FPN* и *DMN* и хорошо согласуются с данными о разной регионарной ассоциации компонентов креативности: сопротивление фиксации — с лобно-височными областями, а оригинальности — с *DMN* [20].

Под “интеллектуальной” стратегией мы понимаем интернально направляемый поиск ответа, оригинальность которого определяется интеллектуальными способностями (ресурсами знаний и логического мышления), а под “спонтанной” — обеспечение дивергентности мышления вследствие заданного разнообразия стимулов. Успешность дивергентного мышления опосредована включением разных компонентов интеллекта, объединение которых позволяет предсказать около 46% включенных в креативность нейронных сетей [5], а причиной его неуспеха может быть отсутствие желания поиска информации [36].

Согласно литературным данным биопотенциалы Δ -диапазона предлагается рассматривать как индикатор мотивационной составляющей деятельности, модулирующей функциональную активность нейронных сетей [37, 38], тогда как β -активность отражает информационную нагрузку и факторы реорганизации когнитивного контроля посредством функций *FPC* [29, 39, 40]. В таком случае, обнаруженную регионарную специфику корреляционных паттернов этих ритмов в $ГР_{KIQ}$ и $ГР_K$ можно интерпретировать как мотивационную преднастройку гибкой реорганизации селективных процессов для поиска оригинальной идеи: соответственно, с опорой на исполнительный контроль или систему отдаленных семантических ассоциаций.

Следовательно, анализ фоновой ЭЭГ позволяет оценить индивидуальные ресурсы реорганизации структур мозга в зависимости от условий тестирования креативности, требующих, в первую очередь, гибкости мышления или беглости в поиске идей. По-видимому, вследствие суммации таких разных стратегий решения проблемной ситуации наблюдаются разные формы взаимосвязи оригинальности, беглости и гибкости при психометрическом тестировании креативности [41, 42]. Этот факт разных способов достижения результата подчеркивается в модели двойного пути к творчеству: как функции гибкого мышления и настойчивости [43], или связью показателей оригинальности и гибкости не только с разными структурами мозга, но и их разнонаправленными ассоциациями [44, 45]. Таким образом, в качестве одного из факторов отмечаемого разнообразия во взаимодействиях структур мозга при анализе креативности [4, 8–11], следует рассматривать разные условия тестирования, так как наиболее часто и в ЭЭГ-, и фМРТ-исследованиях исполь-

зуются задания: “Необычное использование обычного предмета” или “Незавершенные фигуры” — не только разные по своей природе (вербальное и невербальное, соответственно), но и требующие, как показывают результаты нашей работы, разных стратегий поиска ответа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаруженные частотно-пространственные паттерны Δ - и β_2 -ритмов и их взаимосвязи отражают преднастройку функциональной активности коры для использования разных стратегий поиска оригинальной идеи при тестировании креативности. Сочетание низкочастотных биопотенциалов лобной коры и генерализованно представленной высокочастотной β -активности можно связать со стратегией “интеллектуального” поиска оригинального ответа в условиях давления стереотипного решения. Дифференцированно представленная кластеризация β_2 -активности при ее более диффузно распределенной связи с Δ -ритмом с исключением передне-фронтальных областей отражает поиск решения на основе спонтанных менее контролируемых ассоциаций.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированные в Хельсинкской декларации 1984 г. и ее последующими обновлениями, и одобрены локальным этическим комитетом Факультета гуманитарного образования Новосибирского государственного технического университета (Новосибирск).

Информированное согласие. Каждый участник исследования предоставил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Благодарности. Автор выражает благодарность А.А. Яшаниной, Е.А. Хорошавцевой и К.Д. Кривоноговой, принимавших участие в регистрации и первичной обработке ЭЭГ, а также в психометрическом тестировании креативности.

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разумникова О.М. Связь частотно-пространственных параметров фоновой ЭЭГ с уровнем интеллекта и креативности // Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2009. Т. 59. № 6. С. 686.
2. Разумникова О.М. Нейрофизиологические механизмы решения экспериментальных творческих задач: инсайт или критический анализ? // Психология. Журн. Высшей школы экономики. 2021. Т. 18. № 3. С. 623.

3. *Beaty R.E., Chen Q., Christensen A.P. et al.* Brain networks of the imaginative mind: Dynamic functional connectivity of default and cognitive control networks relates to openness to experience // *Hum. Brain Mapp.* 2018. V. 39. № 2. P. 811.
4. *Beaty R.E., Benedek M., Silvia P.J., Schacter D.L.* Creative cognition and brain network dynamics // *Trends Cogn. Sci.* 2016. V. 20. № 2. P. 87.
5. *Frith E., Elbich D.B., Christensen A.P. et al.* Intelligence and creativity share a common cognitive and neural basis // *J. Exp. Psychol. Gen.* 2020. V. 150. № 4. P. 609.
6. *Beaty R.E., Benedek M., Wilkins R.W. et al.* Creativity and the default network: A functional connectivity analysis of the creative brain at rest // *Neuropsychologia.* 2014. V. 64. P. 92.
7. *Beaty R.E., Seli P., Schacter D.L.* Network neuroscience of creative cognition: Mapping cognitive mechanisms and individual differences in the creative brain // *Curr. Opin. Behav. Sci.* 2019. V. 27. P. 22.
8. *Boccia M., Piccardi L., Palermo L. et al.* Where do bright ideas occur in our brain? Meta-analytic evidence from neuroimaging studies of domain-specific creativity // *Front. Psychol.* 2015. V. 6. P. 1195.
9. *Khalil R., Godde B., Karim A.A.* The Link between creativity, cognition, and creative drives and underlying neural mechanisms // *Front. Neural Circuits.* 2019. V. 13. P. 18.
10. *Lin H., Vartanian O.A.* Neuroeconomic framework for creative cognition // *Perspect. Psychol. Sci.* 2018. V. 13. № 6. P. 655.
11. *Ogawa T., Aihara T., Shimokawa T., Yamashita O.* Large-scale brain network associated with creative insight: combined voxel-based morphometry and resting-state functional connectivity analyses // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. № 1. P. 6477.
12. *Colom R., Karama S., Jung R.E., Haier R.J.* Human intelligence and brain networks // *Dialogues Clin. Neurosci.* 2010. V. 12. № 4. P. 489.
13. *Dubois J., Galdi P., Paul L.K., Adolphs R.* A distributed brain network predicts general intelligence from resting-state human neuroimaging data // *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 2018. V. 373. № 1756. P. 20170284.
14. *Langer N., Pedroni A., Gianotti L.R. et al.* Functional brain network efficiency predicts intelligence // *Hum. Brain Mapp.* 2012. V. 33. № 6. P. 1393.
15. *Tadayon E., Pascual-Leone A., Santarnecchi E.* Differential contribution of cortical thickness, surface area, and gyrification to fluid and crystallized intelligence // *Cereb. Cortex.* 2020. V. 30. № 1. P. 215.
16. *Kenett Y.N., Medaglia J.D., Beaty R.E. et al.* Driving the brain towards creativity and intelligence: A network control theory analysis // *Neuropsychologia.* 2018. V. 118. Pt. A. P. 79.
17. *Zhu F., Zhang Q., Qiu J.* Relating inter-individual differences in verbal creative thinking to cerebral structures: an optimal voxel-based morphometry study // *PLoS One.* 2013. V. 8. № 11. P. e79272.
18. *Heinonen J., Numminen J., Hlushchuk Y. et al.* Default Mode and Executive Networks areas: Association with the serial order in divergent thinking // *PLoS One.* 2016. V. 11. № 9. P. e0162234.
19. *Feng Q., He L., Yang W. et al.* Verbal creativity is correlated with the dynamic reconfiguration of brain networks in the resting state // *Front. Psychol.* 2019. V. 10. P. 894.
20. *Hahn J., Kim K.K., Park S.H.* Cortical correlates of creative thinking assessed by the figural Torrance Test of Creative Thinking // *Neuroreport.* 2019. V. 30. № 18. P. 1289.
21. *Mihov K.M., Denzler M., Förster J.* Hemispheric specialization and creative thinking: a meta-analytic review of lateralization of creativity // *Brain Cogn.* 2010. V. 72. № 3. P. 442.
22. *Aziz-Zadeh L., Liew S.L., Dandekar F.* Exploring the neural correlates of visual creativity // *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* 2013. V. 8. № 4. P. 475.
23. *Li W., Yang J., Zhang Q. et al.* The Association between resting functional connectivity and visual creativity // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 25395.
24. *Stevens C.E.J., Zabelina D.L.* Creativity comes in waves: An EEG-focused exploration of the creative brain // *Curr. Opin. Behav. Sci.* 2019. V. 27. P. 154.
25. *Takeuchi H., Taki Y., Hashizume H. et al.* The association between resting functional connectivity and creativity // *Cereb. Cortex.* 2012. V. 22. № 12. P. 2921.
26. *Benedek M., Bergner S., Könen T. et al.* EEG alpha synchronization is related to top-down processing in convergent and divergent thinking // *Neuropsychologia.* 2011. V. 49. № 12. P. 3505.
27. *Benedek M., Jauk E., Sommer M. et al.* Intelligence, creativity, and cognitive control: the common and differential involvement of executive functions in intelligence and creativity // *Intelligence.* 2014. V. 46. P. 73.
28. *Lustenberger C., Boyle M.R., Foulser A.A. et al.* Functional role of frontal alpha oscillations in creativity // *Cortex.* 2015. V. 67. P. 74.
29. *Erickson B., Truelove-Hill M., Oh Y. et al.* Resting-state brain oscillations predict trait-like cognitive styles // *Neuropsychologia.* 2018. V. 120. P. 1.
30. *Kounios J., Fleck J.I., Green D.L. et al.* The origins of insight in resting-state brain activity // *Neuropsychologia.* 2008. V. 46. № 1. P. 281.
31. *Briley P.M., Liddle E.B., Groom M.J. et al.* Development of human electrophysiological brain networks // *J. Neurophysiol.* 2018. V. 120. № 6. P. 3122.
32. *Razumnikova O.M., Krivonogova K.D.* Electroencephalographic correlates of the activity of the frontoparietal system as predictors of verbal intelligence and non-verbal creativity // *Russ. Psychol. J.* 2019. V. 16. № 2/1. P. 45.
33. *Solomon E.A., Kragel J.E., Sperling M.R. et al.* Widespread theta synchrony and high-frequency desynchronization underlies enhanced cognition // *Nat. Commun.* 2017. V. 8. № 1. P. 1704.
34. *Hacker C.D., Snyder A.Z., Pahwa M. et al.* Frequency-specific electrophysiologic correlates of resting state fMRI networks // *Neuroimage.* 2017. V. 149. P. 446.
35. *Разумникова О.М.* Способы определения креативности. Новосибирск: НГТУ, 2002. 35 с.
36. *Harms M., Reiter-Palmon R., Derrick D.C.* The role of information search in creative problem solving // *Psychol. Aesthet. Creat. Arts.* 2020. V. 14. № 3. P. 367.

37. *Harmony T.* The functional significance of delta oscillations in cognitive processing // *Front. Integr. Neurosci.* 2013. V. 7. P. 83.
38. *Knyazev G.G.* EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2012. V. 36. № 1. P. 677.
39. *Rogala J., Kublik E., Krauz R., Wróbel A.* Resting-state EEG activity predicts fronto-parietal network reconfiguration and improved attentional performance // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. № 1. P. 5064.
40. *Stoll F.M., Wilson C.R.E., Faraut M.C.M. et al.* The effects of cognitive control and time on frontal beta oscillations // *Cereb. Cortex.* 2016. V. 26. № 4. P. 1715.
41. *Shaw G.A., DeMers S.T.* The relationship of imagery to originality, flexibility and fluency in creative thinking // *J. Ment. Imagery.* 1986. V. 10. № 1. P. 65.
42. *Zabelina D.L., Robinson M.* Creativity as flexible cognitive control // *Psychol. Aesthet. Creat. Arts.* 2010. V. 4. № 3. P. 136.
43. *Nijstad B.A., De Dreu C.K.W., Rietzschel E.F., Baas M.* The dual pathway to creativity model: creative ideation as a function of flexibility and persistence // *Eur. Rev. Soc. Psychol.* 2010. V. 21. P. 34.
44. *Benedek M., Franz F., Heene M., Neubauer A.C.* Differential effects of cognitive inhibition and intelligence on creativity // *Pers. Individ. Dif.* 2012. V. 53. № 4. P. 480.
45. *Chen Q.L., Xu T., Yang W.J. et al.* Individual differences in verbal creative thinking are reflected in the precuneus // *Neuropsychologia.* 2015. V. 75. P. 441.

Fronto-Parietal Patterns of Delta and Beta EEG Oscillations as Correlates of the Conditions of Creativity Testing

O. M. Razumnikova*

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

*E-mail: razoum@mail.ru

Recently, much attention has been paid to the mechanism of cooperation between the fronto-parietal system and the default system, since their “pre-tuning” at rest and the subsequent dynamics of functional interaction are associated with an individual variety of strategies for performing tasks while creativity testing. To study the EEG correlates of such strategies, we analyzed the regional specificity of Δ - and β -oscillations in the resting-state and compared them with the results of testing of creativity and intelligence in 37 university students (18 ± 1.1 years; 27 women and 10 men). The indicators of originality of responses when testing creativity were calculated using the databases we created earlier for the subtests “Circles”, “Incomplete figures”, “Unusual use of ordinary objects” and an expert assessment of the originality of sentences made up of words belonging to distant semantic categories. The verbal and figurative components of intelligence were assessed according to the Amthauer intelligence structure subtests. Using the cluster analysis of the listed indicators of creativity and intelligence, we identified two groups of study participants: one (GR_{KIQ}) was characterized by a combination of higher values of intelligence and originality of answers in those tasks where it was required to reject stereotypical ideas while limiting the time for their search, and the other (GR_K) – relatively lower intelligence, but high originality of solving the problem in terms of testing creativity with a variety of stimuli and without time limits. These two clusters differed in the regional organization of the power of the Δ - and β_2 -rhythms and in the correlation patterns of these rhythms: GR_{KIQ} is represented by wide-spread high-frequency β -activity and its correlation with low-frequency biopotentials in the frontal cortex whereas GR_K is characterized by cortical mosaic of the β_2 -activity with its diffusely distributed correlations with the Δ -rhythm by the exception of the anterior frontal areas. The detected effects can be considered as a “pre-tuning” to the strategy of “intelligent” search for an original answer under conditions of resistance to fixation on a stereotyped idea in the GR_{KIQ} or a solution based on a spontaneous search for distant associations in the GR_K .

Keywords: creativity, intelligence, EEG, frontal-parietal system, default system, Δ - and β -oscillations.