

Голова | Head

ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-2020-2-119-130>

Определение эффективности использования счета в качестве фМРТ-парадигмы при исследовании функциональных связей в норме для оценки управляющих функций мозга

© Морозова С.Н.^{1*}, Кремнева Е.И.¹, Гаджиева З.Ш.¹,
Ахметзянов Б.М.², Кротенкова М.В.¹, Добрынина Л.А.¹

¹ ФГБНУ «Научный центр неврологии»; 125367 Москва, Волоколамское шоссе, д. 80, Российская Федерация

² ООО «ПЭТ-Технологджи»; 450054 Уфа, ул. Рихарда Зорге, д. 58, стр. 2, Российская Федерация

Цель исследования: сравнительный анализ функциональных связей коры головного мозга при выполнении модификаций теста Струпа и теста счет про себя.

Материал и методы. Исследование было проведено на 18 здоровых добровольцах, которым выполнялась фМРТ на 3 Тл магнитно-резонансном томографе с использованием двух блоковых парадигм: модификаций теста Струпа и теста счет про себя.

Результаты. Анализ функциональных связей при обработке данных фМРТ показал, что, несмотря на вовлечение сходных структур, характер распределения связей отличается: при выполнении теста Струпа межполушарные связи наблюдались между передними отделами островка, а при счете про себя – латеральной префронтальной корой с обеих сторон и нижними отделами теменных долей с обеих сторон. Различия распределения связей обусловлены, вероятно, спецификой предложенных заданий. При сравнительном анализе корреляций парадигмы значительно отличались по связям со зрительной корой, которые были больше при выполнении модификации теста Струпа.

Заключение. Полученные данные свидетельствуют о возможности эффективного альтернативного использования модификации теста счет про себя для оценки управляющих функций мозга, а также его преимуществах при обследовании пациентов с нарушениями зрения.

Ключевые слова: функциональная МРТ, блоковая парадигма, управляющие функции мозга, функциональная связность

Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Морозова С.Н., Кремнева Е.И., Гаджиева З.Ш., Ахметзянов Б.М., Кротенкова М.В., Добрынина Л.А. Определение эффективности использования счета в качестве фМРТ-парадигмы при исследовании функциональных связей в норме для оценки управляющих функций мозга. *Медицинская визуализация*. 2020; 24 (2): 119–130. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-2020-2-119-130>

Поступила в редакцию: 25.09.2019. Принята к печати: 05.05.2020. Опубликовано online: 19.06.2020.

Evaluation of fMRI counting task efficiency for normal brain functional connectivity analysis during executive function examination

© Sofya N. Morozova^{1*}, Elena I. Kremneva¹, Zukhra Sh. Gadzhieva¹,
Bulat M. Akhmetzyanov², Marina V. Krotenkova¹, Larisa A. Dobrynina¹

¹ Federal State Budgetary Scientific Institution “Research Center of Neurology”; 80, Volokolamskoye Shosse, 125367, Moscow, Russian Federation

² PET-Technology; 58-2, Richard Sorge str., 450054, Ufa, Russian Federation



Aim: to explore functional connectivity of the normal brain during Stroop test modification and new suggested counting test performance.

Materials and methods. Data were acquired from 18 healthy volunteers who underwent fMRI examination on 3T scanner with Stroop test modification and new suggested counting test used as block paradigms.

Results. Functional connectivity analysis showed involvement of similar regions but with different distribution of positive correlations between them: interhemispheric significant positive correlations during Stroop test modification performance were found between anterior insular cortex, interhemispheric significant positive correlations during counting test performance were found between dorsolateral prefrontal cortices bilaterally and inferior parietal cortices bilaterally. Different distribution of significant correlations could be due to specificity of tasks. Comparative analysis showed significantly higher positive correlations with occipital cortex during Stroop test performance.

Conclusions. Received data allow alternative use of the abovementioned paradigms for executive functions investigation, with preference for counting test paradigm in patients with vision disturbances.

Keywords: task functional MRI, block paradigm, executive functions, functional connectivity

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Morozova S.N., Kremneva E.I., Gadzhieva Z.Sh., Akhmetzyanov B.M., Krotchenkova M.V., Dobrynya L.A. Evaluation of fMRI counting task efficiency for normal brain functional connectivity analysis during executive function examination. *Medical Visualization*. 2020; 24 (2): 119–130. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-2020-2-119-130>

Received: 25.09.2019.

Accepted for publication: 05.05.2020.

Published online: 19.06.2020.

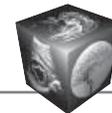
Введение

Функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ) занимает прочное место в ряду основных нейровизуализационных методик, используемых в клинике и для многочисленных научных исследований как за рубежом, так и в России [1–5]. Метод позволяет картировать распределение нейрональной активности, о которой косвенно судят по изменению интенсивности BOLD MR-сигнала (BOLD – blood oxygenation level dependent) в зависимости от процентного содержания дезоксигемоглобина в сосудах головного мозга. Колебания BOLD-сигнала происходят и вне выполнения какой-либо активной деятельности [6, 7], однако для увеличения амплитуды этих колебаний и облегчения картирования функций используют парадигмы – задания, направленные на активацию определенных областей мозга, которые предлагаются пациентам или здоровым испытуемым непосредственно во время выполнения сканирования. Функциональная МРТ с блоковым дизайном представления задания остается одной из наиболее простых и востребованных методик для клинических исследований [8]. Функциональная связность (или коннективность) представляет собой статистическое объединение или зависимость двух или более анатомически разделенных областей во временном ряду без учета причинно-следственных взаимоотношений между ними и направления связей [9, 10]. Большинство фМРТ-исследований функциональной коннективности проводят в состоянии покоя (Resting state fMRI), тем не менее есть ряд статей, описывающих влияние выполнения задания на функциональную связность. В этих работах было показано, что активное выполнение

задания изменяет паттерны функциональной коннективности, полученные в состоянии покоя [11–13]. По данным разных авторов, от 38 до 76,2% связей отличается при выполнении задания по сравнению с состоянием покоя [12, 14]. Так, активная деятельность в целом приводит к усилению корреляций между сетями, вовлеченными в выполнение задания, а также между другими, обычно обособленными зонами [15]. Таким образом, несмотря на сохранность сетевой топографии в целом, при переключении с состояния покоя на активное выполнение задания происходит реконфигурация функциональных связей [12, 16]. В связи с этим вполне возможны несоответствия между паттернами активации и функциональной коннективностью при выполнении заданий, которые предоставляют дополнительные, а не повторяющие друг друга данные о реакции мозга на активную деятельность [17, 18].

Самыми сложными для оценки являются когнитивные функции в связи с большой вариабельностью и малой воспроизводимостью результатов не только у пациентов, но и у здоровых испытуемых. Однако вопрос изучения именно когнитивных, а в особенности управляющих функций мозга (УФМ) остается актуальным для множества неврологических заболеваний [19].

Под УФМ (син.: *исполнительные, регуляторные*) понимают ряд взаимосвязанных когнитивных процессов, необходимых для осуществления целенаправленной деятельности, которые включают в себя постановку цели, планирование действия, следование построенному плану, мониторинг выполнения ошибок и адаптацию плана и поведения к изменяющимся условиям внешней среды [20–22].



Многочисленные фМРТ-исследования с использованием различных тестов для исследования УФМ выявили участие в их реализации многочисленных структур, которые объединяют в сеть многокомпонентных задач (multiple-demand network), включающую, в свою очередь, фронтопариетальную сеть (син.: *исполнительная сеть*, англ.: *executive network, frontoparietal network*) и сеть выявления значимости стимулов (син.: *цингуло-оперкулярная сеть*, англ.: *saliency network, cingulo-opercular network*) [23, 24].

Для оценки УФМ часто используют тест Струпа [25, 26], который является классической нейропсихологической методикой исследования регуляторных функций с преимущественным компонентом торможения [27]. Модификации теста Струпа использовались многими авторами в качестве фМРТ-парадигмы с целью изучения когнитивных функций [28–32]. Тем не менее в связи с активным участием зрительного анализатора при выполнении данного теста, необходимостью наличия сохранного цветового зрения и должной остроты зрения актуальным является вопрос о внедрении более простой в применении фМРТ-парадигмы для исследования УФМ. Так, у здоровых испытуемых была использована парадигма с задачей “обратный счет в уме от 100 по 7” [33]. Работа, проведенная на небольшом количестве испытуемых (8 человек), частично подтвердила ранее полученные данные о паттернах гемодинамического ответа при вычитании простых чисел [34], при этом не были выявлены некоторые важные для когнитивных процессов зоны (мозжечок), которые были получены при простом порядковом счете про себя от 1 до 30 [35]. В связи с этим нами была предложена оригинальная, более простая для объяснения и выполнения пациентами парадигма, задание которой заключалось в выполнении испытуемым счета про себя от одного и далее с пропуском чисел, кратных трем, которая также включает автоматическую операцию порядкового счета, но с акцентом на способность к переключению, необходимую для перехода между программами последовательного счета и деления на три.

Кроме того, несмотря на широкое применение прямого и обратного счета в фМРТ-исследованиях [36], изучение особенностей функциональных связей коры головного мозга при использовании счета с пропуском чисел для исследования УФМ до настоящего времени не проводилось.

Цель исследования

Сравнительное исследование функциональных связей между зонами внутри сети многокомпонентных задач с другими регионами коры голов-

ного мозга при использовании модификации теста Струпа в качестве традиционной фМРТ-парадигмы и предложенного варианта счета про себя – в качестве оригинальной.

Материал и методы

Работа была выполнена на группе здоровых добровольцев, состоящей из 10 женщин и 8 мужчин в возрасте от 45 до 63 лет (медиана 58,5 года, 1-й и 3-й квартили [54,75; 62,25]), все с преобладанием функции правой руки, без патологии со стороны центральной нервной, сердечно-сосудистой и других систем органов. МРТ проводилась испытуемым на томографе Siemens MAGNETOM Verio с величиной магнитной индукции 3 Тл. Протокол сканирования включал в себя исследование головного мозга в режиме T2-взвешенных изображений (последовательность спиновое эхо) в аксиальной проекции (T2_tse: TR 4000 мс, TE 118 мс, толщина 5,0 мм, интервал 1,5 мм, время сканирования 2 мин 02 с) для исключения структурных повреждений вещества мозга; последовательности градиентное эхо для получения данных фМРТ (ep2d_bold: TR 3000 мс, TE 30 мс, толщина 3,0 мм, интервал 0,8 мм, количество измерений 80, длина парадигмы 20 измерений, продолжительность каждого блока 10 измерений, количество срезов 35, время сканирования 4 мин 08 с) в аксиальной проекции; в режиме 3D-T1-взвешенных изображений в сагиттальной проекции для получения подробных анатомических данных с возможностью реконструкции изображений в любых проекциях с целью последующего наложения на них функциональных данных (T1_mpr_sag_p2_iso: TR 1900 мс, TE 2,5 мс, толщина 1,0 мм, интервал 1,0 мм, количество срезов 176, время сканирования 4 мин 18 с).

При проведении фМРТ-исследования использовались две парадигмы с блоковым дизайном [37]. В качестве задания в первом случае использовался модифицированный тест Струпа (прямая интерференция): в соответствующие временные промежутки на экране здоровым добровольцам предлагались названия цветов, написанные разным цветом чернил, при несовпадении названия и цвета чернил (неконгруэнтный стимул), испытуемым предлагалось игнорировать надписи, а при совпадении (конгруэнтный стимул) – “отмечать” это про себя. В качестве задания для второй парадигмы нами была предложена модификация нейропсихологического теста серийного устного счета, используемого для оценки УФМ [38]: после голосовой команды испытуемым предлагалось выстроить про себя числовой ряд от 1, пропуская числа, кратные трем. Указанные задания не пред-



полагали получения обратной связи от испытуемых, однако все они перед проведением исследования проходили тренинг с целью контроля корректного выполнения заданий.

Для каждой парадигмы за время одного сканирования (4 мин 8 с) было получено 80 измерений всего объема головного мозга: для получения данных фМРТ проводилось чередование периодов покоя и активации (по 4 для парадигмы), продолжительность каждого периода составила 30 с, за которые получали 10 измерений всего объема головного мозга.

Для обработки данных фМРТ использовались пакеты программ SPM12 (Statistical parametric mapping, Wellcome Trust Centre for Neuroimaging, London, UK) и CONN17.a [39] на базе MATLAB R2013a (8.1.0.604). Предобработка нейровизуализационных данных, включавшая коррекцию положения головы испытуемого, корегистрацию функциональных и анатомических данных, сегментацию анатомических данных, пространственную нормализацию с размером вокселя для функциональных данных $3 \times 3 \times 3$ мм, для анатомических данных $1 \times 1 \times 1$ мм (с приведением данных к пространственной системе координат MNI – Montreal Neurological Institute [40]) и сглаживание с размером ядра $8 \times 8 \times 8$ мм, проводилась с использованием SPM12. Далее обработанные анатомические и функциональные данные загружались в CONN17.a, где сначала проводилась процедура удаления шума. Затем для исследования функциональных связей использовался корреляционный анализ Пирсона с последующим применением трансформации Фишера для каждого испытуемого, групповой анализ проводился посредством одновыборочного критерия Стьюдента (one-sample t-test) с порогом статисти-

ческой значимости $p < 0,000001$ с коррекцией на множественные сравнения (эффект множественных сравнений был оценен по частоте ложных обнаружений – FDR (false discovery rate)). Для сравнительного анализа был выбран двувыворочный критерий Стьюдента (two-sample t-test) с порогом статистической значимости $p < 0,05$ с коррекцией на множественные сравнения (эффект множественных сравнений был оценен по частоте ложных обнаружений – FDR (false discovery rate)), а не t-тест для парных выборок, так как в итоговые группы сравнения было включено по 16 пациентов, не все из которых вошли в обе группы.

Во время предварительного статистического анализа данных фМРТ для каждого обследуемого были получены данные о связях между структурами головного мозга (seed-to-voxel analysis, т.е. от выбранных исходных (seed) зон интереса (ROI, region-of-interest) ко всем вокселям изображения). При последующем групповом анализе исследование корреляций выполнялось между зонами интереса (ROI-to-ROI analysis, т.е. от каждой выбранной зоны интереса ко всем остальным зонам головного мозга согласно встроенным атласам). В качестве зон интереса из встроенных по умолчанию в CONN 17.a атласов (AAL, Harvard-Oxford Atlas, и собственный атлас нейрональных сетей, полученный в результате анализа независимых компонент в программе CONN на 497 испытуемых из базы Human connectome project [39]) были выбраны 11 регионов, входящие в так называемую сеть многокомпонентных задач (табл. 1).

На представленный дизайн исследования было получено разрешение локального этического комитета ФГБНУ НЦН (протокол No 1-8/16 от 27.01.2016), действующего в соответствии с Хельсинской декларацией Всемирной меди-

Таблица 1. Зоны, выбранные в качестве исходных зон интереса для анализа

Table 1. Seed regions-of-interest for second-level analysis

Сеть многокомпонентных задач	Зона	Координаты в пространстве MNI	Поле Бродмана
Сеть выявления значимости	Передние отделы цингулярной коры	0 22 35	32
	Передние отделы островка (слева)	-44 13 1	13
	Передние отделы островка (справа)	47 14 0	13
	Ростральная префронтальная кора (слева)	-32 45 27	10
	Ростральная префронтальная кора (справа)	32 46 27	10
	Надкраевая извилина (слева)	-60 -39 31	40
	Надкраевая извилина (справа)	62 -35 32	40
Фронтопариетальная сеть	Латеральная префронтальная кора (слева)	-43 33 28	46, 9
	Нижняя теменная доля (слева)	-46 -58 49	40
	Латеральная префронтальная кора (справа)	41 38 30	46, 9
	Нижняя теменная доля (справа)	52 -52 45	40

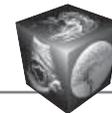


Таблица 2. Достоверные положительные корреляции между зонами головного мозга при выполнении теста Струпа, $p_{FDRcorr}^* < 0,0001$ (по результатам группового анализа ($n = 16$))

Table 2. Significant positive correlations between brain regions during Stroop color word test, $p_{FDRcorr}^* < 0.0001$ ($n = 16$)

Связанные области		T**
Левая нижняя теменная доля	Левая ангулярная извилина	21,21
Правая нижняя теменная доля	Правая ангулярная извилина	16,44
Передняя цингулярная кора	Цингулярная извилина, передние отделы	15,25
Левая нижняя теменная доля	Левая средняя лобная извилина	14,25
Латеральная префронтальная кора слева	Левая средняя лобная извилина	13,33
Передние отделы островка справа	Кора островка справа	13,22
Передние отделы островка справа	Лобные отделы оперкулярной коры справа	12,26
Правая нижняя теменная доля	Задние отделы правой средней височной извилины	12,19
Передние отделы островка слева	Передние отделы островка справа	11,9

* $p_{FDRcorr}$ – p-значение с коррекцией на множественные сравнения (эффект множественных сравнений был оценен по частоте ложных обнаружений – FDR (false discovery rate)).

** T – критическая точка распределения Стьюдента, показатель достоверности статистической гипотезы, рекомендуемый к использованию при выборках менее 30 человек с неизвестным стандартным отклонением популяции.

цинской ассоциации “Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека” с поправками от 2013 г. и в соответствии с правилами клинической практики в Российской Федерации, утвержденными приказом Минздрава РФ от 01.04.2016 №200н. Обследование выполнялось после получения информированного согласия на участие у каждого испытуемого.

Результаты

Анализ функциональной связности при использовании в качестве парадигмы модификации теста Струпа показал у здоровых испытуемых наличие достоверных положительных корреляций, подробно описанных в табл. 2. Помимо связей

между описанными зонами интереса внутри сети многокомпонентных задач, при выполнении теста наблюдалось также образование связей с ангулярными извилинами с обеих сторон, оперкулярной корой справа, задними отделами правой средней височной извилины. При этом межполушарные связи наблюдались между передними отделами островка билатерально (рис. 1).

Анализ функциональной связности при использовании в качестве парадигмы модификации теста счет про себя у здоровых добровольцев показал наличие связей, описанных в табл. 3. Общее количество положительных корреляций, превышающих порог достоверности, при счете про себя несколько превышало таковые при выполнении

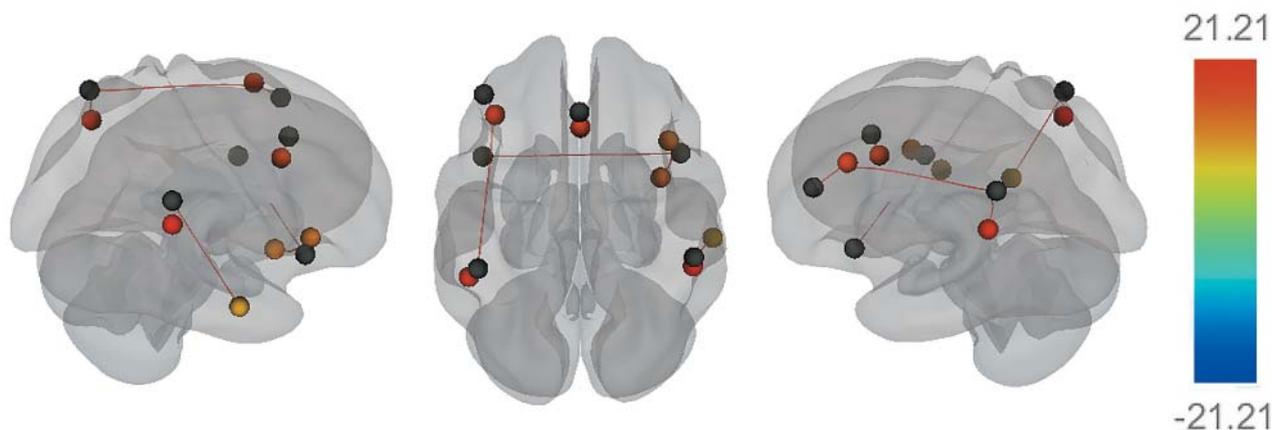


Рис. 1. Достоверные положительные корреляции (функциональные связи, обозначены линиями) между зонами коры головного мозга (обозначены кружками: черные соответствуют исходным зонам интереса, остальные – значениям T в соответствии со шкалой справа) при выполнении модификации теста Струпа.

Fig. 1. Significant positive correlations between brain regions during Stroop color word test performance.



Таблица 3. Достоверные положительные корреляции между зонами головного мозга при счете про себя, $p_{FDRcorr} < 0,0001$ (n = 16)

Table 3. Significant positive correlations between brain regions during counting test, $p_{FDRcorr} < 0.0001$ (n = 16)

Связанные области		T
Левая латеральная префронтальная кора	Левая средняя лобная извилина	26,05
Правая нижняя теменная доля	Правая угловая извилина	24,67
Правая нижняя теменная доля	Левая нижняя теменная доля	17,30
Правая латеральная префронтальная кора	Правая средняя лобная извилина	14,95
Передняя цингулярная кора	Правая парацингулярная извилина	13,59
Правая латеральная префронтальная кора	Полюс правой лобной доли	12,58
Правая ростральная префронтальная кора	Задние отделы правой надкраевой извилины	12,54
Передние отделы цингулярной коры	Цингулярная извилина, передние отделы	11,78
Правая латеральная префронтальная кора	Полюс левой лобной доли	11,58
Правая латеральная префронтальная кора	Левая латеральная префронтальная кора	11,53

Таблица 4. Результаты сравнительного анализа функциональных связей при выполнении теста Струпа и счете про себя (тест Струпа больше счета)

Table 4. Comparative analysis of functional connectivity during Stroop color word test and counting test performance (Stroop test > counting test)

Связанные области		T	$p_{FDRcorr}$
Передние отделы цингулярной коры	Левая шпорная кора	5,23	0,0024
Передние отделы цингулярной коры	Клин левой затылочной доли	4,05	0,0297

теста Струпа: 11 к 9. Помимо связей внутри сети многокомпонентных задач также наблюдалось образование связей указанных исходных зон с правой ангулярной извилиной, правой надкраевой извилиной, парацингулярной извилиной и полюсами лобных долей. При этом межполушарные связи наблюдались между латеральной префронтальной корой с обеих сторон и нижними отделами теменных долей с обеих сторон (рис. 2).

Сравнительный анализ связей показал более сильные корреляции с затылочной корой при выполнении теста Струпа (табл. 4).

Обсуждение

Проведенный в работе анализ функциональных связей направлен на исследование и оценку межрегиональных взаимоотношений в головном мозге [10] при выполнении заданий для исследования

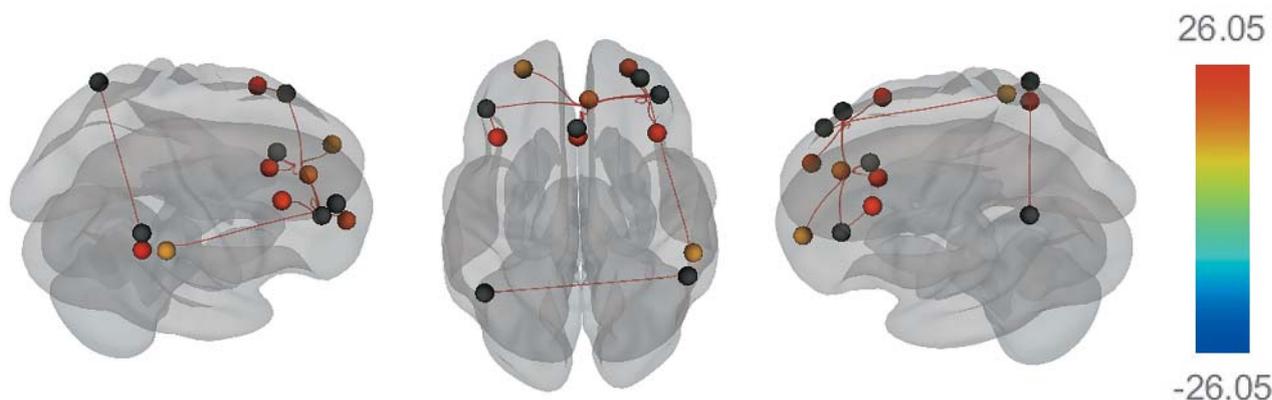
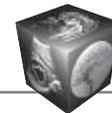


Рис. 2. Достоверные положительные корреляции (функциональные связи, обозначены линиями) между зонами коры головного мозга (обозначены кружками: черные соответствуют исходным зонам интереса, остальные – значениям T в соответствии со шкалой справа) при счете про себя.

Fig. 2. Significant positive correlations between brain regions during counting test performance.

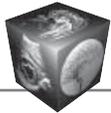


УФМ с акцентом на ингибирование (модификация теста Струпа) и переключение (модификация теста счет про себя). Анализ зарубежной и отечественной литературы по вопросам анализа функциональной связности при выполнении заданий с акцентом на различные компоненты УФМ выявил немногочисленные статьи, среди которых наибольший интерес в рамках настоящей работы представляют следующие. P. Stiers и соавт. (2018) [41] провели сравнительный анализ функциональных связей вокселей основных зон сети многокомпонентных задач во время выполнения трех различных когнитивных парадигм (тест Эриксона на ингибирование, задача 1 – назад на рабочую память и тест на переключение с обратной связью) и показали стабильность функциональной связи между парами вокселей с более сильным ответом на конкретное задание (“предпочитающими” его) вне зависимости от того, какое задание выполняется. Это свидетельствует о том, что функциональные связи между ними не временны, а являются результатом анатомических связей между популяциями нейронов, “предпочитающими” конкретное задание в данных вокселях [41]. Результаты данной работы отчасти объясняют полученные нами достоверные положительные корреляции между схожими анатомическими областями, несмотря на выполнение испытуемыми заданий с акцентом на различные компоненты УФМ. Единственная найденная нами работа по оценке функциональной связности во время выполнения теста Струпа была проведена на основании данных позитронно-эмиссионной томографии с использованием в качестве контраста различий между неконгруэнтными и конгруэнтными стимулами (интерференция), при этом достоверные положительные корреляции были обнаружены между правыми глазничными извилинами и медиальной лобной извилиной, левой средней и латеральной префронтальной корой, левой дополнительной моторной корой, мозжечком и правым островком [42]. В настоящей работе в качестве контраста использовалась разница между активным состоянием, включавшим оценку испытуемым как конгруэнтных, так и неконгруэнтных стимулов, и состоянием покоя, с чем, вероятно, связано большее количество достоверных положительных корреляций, детально описанных ниже.

При выполнении модифицированного теста Струпа у здоровых испытуемых были обнаружены достоверные положительные корреляции, в том числе межполушарные, внутри и между корой островка с обеих сторон, а также с оперкулярной корой справа. Согласованное повышение нейрональной активности островков и параинсулярной

области согласуется с необходимым для выполнения теста мониторингом исполнения задания, наличием презентаций нового стимула и его эмоциональной оценки [43]. При этом левая дорсолатеральная префронтальная кора (левая средняя лобная извилина в табл. 2) была связана с левой нижней теменной долькой, активно участвующей в чтении и рабочей памяти у правшей [38, 43–45]. Нижние теменные дольки с обеих сторон, в свою очередь, были связаны с соответствующими ангулярными извилинами, участвующими во множестве когнитивных функций, среди которых для выполнения задания важны чтение и понимание слов, извлечение из памяти, внимание, способность к рассуждению [46]. Кроме того, отмечалась связь правой нижней теменной дольки с задними отделами правой средней височной извилины, функция которой связана с процессами языковой и семантической памяти [47], необходимыми для выполнения теста Струпа. Также были получены достоверные положительные корреляции внутри передних отделов цингулярной извилины, описанной как центральный узел сети выявления значимости стимула, функционирование которой связано в том числе с мониторингом ошибок [48].

Анализ данных фМРТ при выполнении второго задания показал несколько иное распределение положительных корреляций при том же пороге достоверности, связанное, вероятно, со спецификой предлагаемого теста (счет про себя по голосовой команде). Наиболее сильные и межполушарные связи наблюдались между структурами теменных долей, что можно объяснить важной ролью этих областей не только в работе оперативной памяти и создании представлений о звучании слов, но также в выполнении арифметических действий и слуховом внимании [43]. Достоверные межполушарные связи также выделялись между дорсолатеральной префронтальной корой с обеих сторон, что, вероятно, связано с такими ее основными функциями, как планирование, принятие решений, запоминание информации, удержание ее при отвлечении внимания и извлечение из памяти в случае надобности [49, 50], необходимыми для выполнения представленного задания. Правая нижняя теменная долька, так же как и при выполнении теста Струпа, была связана с соответствующей ангулярной извилиной, что при счете про себя скорее обусловлено ее участием в числовых операциях [46]. Кроме того, правая роstralная префронтальная кора достоверно положительно коррелировала с правой надкраевой извилиной. Было показано, что надкраевая извилина участвует в автоматическом просчете звучания слова,



даже когда задание напрямую этого не требует [44], вероятно, это может происходить и при порядковом счете про себя. Правая латеральная префронтальная кора, в свою очередь, была связана с полюсами обеих лобных долей, которые, предположительно, формируют функциональную “надбавку” к активности латеральной префронтальной коры в выборе альтернативных путей поведения и, более того, являются уникальной для человека функциональной зоной, обеспечивающей дополнительную способность к переключению, появление которой может объяснить скачок способностей к рассуждению и планированию у человека по сравнению с приматами [51]. Кроме того, отмечались достоверные положительные корреляции между зонами внутри передних отделов цингулярной коры, участвующей в мониторинговании ошибок при целенаправленной деятельности, и с правой парацингулярной извилиной, активность которой может быть связана со словообразованием [52], имеющим место при счете про себя.

Сравнительный анализ связей показал, что при выполнении теста Струпа наблюдаются более сильные корреляции между передними отделами цингулярной коры и затылочной корой по сравнению со счетом про себя, что, вероятно, может быть объяснено активным участием зрительного анализатора в выполнении теста Струпа.

Заключение

Таким образом, анализ функциональных связей при обработке данных фМРТ с использованием двух парадигм (модификаций теста Струпа и предложенного теста счет про себя), направленных на тестирование управляющих функций мозга, показал, что, несмотря на вовлечение сходных структур, характер распределения связей отличается. Отмеченные различия связаны, вероятно, со спецификой предложенных заданий. Эти данные, а также значимые различия связей со зрительной корой при выполнении двух парадигм свидетельствуют о возможности эффективного использования модификации теста счет про себя при обследовании пациентов с нарушениями зрения для изучения управляющих функций мозга. Однако, учитывая различное пространственное распределение связей, представляется интересным изучение их изменений при выполнении данных тестов у пациентов с различной степенью выраженности когнитивных нарушений.

Участие авторов

Морозова С.Н. – статистическая обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста, подготовка и редактирование текста, подготов-

ка, создание опубликованной работы, ответственность за целостность всех частей статьи.

Кремнева Е.И. – концепция и дизайн исследования, проведение исследования, сбор и обработка данных, участие в научном дизайне.

Гаджиева З.Ш. – концепция и дизайн исследования, проведение исследования, сбор и обработка данных, статистическая обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, участие в научном дизайне.

Ахметзянов Б.М. – проведение исследования, сбор и обработка данных.

Кротенкова М.В. – концепция и дизайн исследования, участие в научном дизайне, утверждение окончательного варианта статьи.

Добрынина Л.А. – концепция и дизайн исследования, участие в научном дизайне, утверждение окончательного варианта статьи.

Authors' participation

Morozova S.N. – statistical analysis, analysis and interpretation of the obtained data, writing text, text preparation and editing, preparation and creation of the published work, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Kremneva E.I. – concept and design of the study, conducting research, collection and analysis of data, participation in scientific design.

Gadzhieva Z.Sh. – concept and design of the study, conducting research, collection and analysis of data, statistical analysis, analysis and interpretation of the obtained data, participation in scientific design.

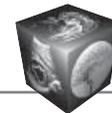
Akhmetzyanov B.M. – conducting research, collection and analysis of data.

Krotchenkova M.V. – concept and design of the study, participation in scientific design, approval of the final version of the article.

Dobrynina L.A. – concept and design of the study, participation in scientific design, approval of the final version of the article.

Список литературы

1. Кротенкова М.В., Брюхов В.В., Морозова С.Н., Кремнева Е.И., Сергеева А.Н., Древаль М.В., Кротенкова И.А., Коновалов Р.Н., Суслин А.С. Современные технологии нейровизуализации. *Радиология-практика*. 2017; 62 (2): 47–63.
2. Кремнева Е.И., Змейкина Э.А., Морозова С.Н., Суслин А.С., Коновалов Р.Н., Кротенкова М.В. Функциональная магнитно-резонансная томография в неврологии. М.: ИП Мартынов, 2016. 90 с. ISBN 978-5-9905509-6-4.
3. Шарова Е.В., Гаврон А.А., Абдулаев А.А., Смирнов А.С., Фадеева Л.М., Челябинка М.В., Жаворонкова Л.А., Болдырева Г.Н., Куликов М.А., Верхлютов В.М., Пронин И.Н., Корниенко В.Н. Опыт фМРТ-анализа состояния покоя (resting state) здоровых испытуемых с использованием программного обеспечения FSL. *Медицинская визуализация*. 2017; 4: 6–17.



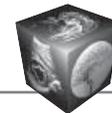
4. Розовская Р.И., Печенкова Е.В., Мершина Е.А., Мачинская Р.И. ФМРТ исследование удержания в рабочей памяти изображений различной эмоциональной валентности. *Психология. Журнал высшей школы экономики*. 2014; 1 (11): 27–48.
5. Куликова С.Н., Переседова А.В., Кротенкова М.В., Брюхов В.В., Трифонова О.В., Завалишин И.А. Динамическое исследование реорганизации коры и структуры проводящих путей при ремиттирующем рассеянном склерозе с парезом кисти. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. 2014; 1 (8): 22–29.
6. Biswal B., Yetkin F.Z., Haughton V.M., Hyde J.S. Functional connectivity in the motor cortex of resting human brain using echo-planar MRI. *Magn. Res. Med.* 1995; 34 (4): 537–541. <https://doi.org/10.1002/mrm.1910340409>
7. Селиверстова Е.В., Селиверстов Ю.А., Коновалов Р.Н., Иллариошкин С.Н. Функциональная магнитно-резонансная томография покоя: новые возможности изучения физиологии и патологии мозга. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. 2013; 4 (7): 39–44.
8. Buchbinder B.R. Functional magnetic resonance imaging. *Handb. Clin. Neurol.* 2016; 135: 61–92. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53485-9.00004-0>
9. Friston K.J., Frith C.D., Fletcher P., Liddle P.F., Frackowiak R.S. Functional topography: multidimensional scaling and functional connectivity in the brain. *Cereb. Cortex*. 1996; 6 (2): 156–164. <https://doi.org/10.1093/cercor/6.2.156>
10. Friston K.J., Worsley K.J., Frackowiak R.S., Mazziotta J.C., Evans A.C. Assessing the significance of focal activations using their spatial extent. *Hum. Brain Mapp.* 1994; 1 (3): 210–220. <https://doi.org/10.1002/hbm.460010306>
11. Foster B.L., Rangarajan V., Shirer W.R., Parvizi J. Intrinsic and task-dependent coupling of neuronal population activity in human parietal cortex. *Neuron*. 2015; 86: 578–590. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.03.018>
12. Cole M., Bassett D., Power J., Braver T., Petersen S. Intrinsic and Task-Evoked Network Architectures of the Human Brain. *Neuron*. 2014; 83: 238–251. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2014.05.014>
13. Spadone S., Penna S., Sestieri C., Betti V., Tosoni A., Perrucci M., Romani G., Corbetta M. Dynamic reorganization of human resting-state networks during visuo-spatial attention. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2015; 112: 8112–8117. <https://doi.org/10.1073/pnas.1415439112>
14. Kaufmann T., Alnæs D., Brandt C., Doan N., Kauppi K. Task modulations and clinical manifestations in the brain functional connectome in 1615 fMRI datasets. *NeuroImage*. 2017; 147: 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.11.073>
15. Shine J., Bissett P., Bell P., Koyejo O., Balsters J. The dynamics of functional brain networks: Integrated network states during cognitive task performance. *Neuron*. 2016; 92: 544–554. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.09.018>
16. Krienen F., Yeo T., Buckner R. Reconfigurable task-dependent functional coupling modes cluster around a core functional architecture. *Philosophical Transactions Royal Soc. B. Biol. Sci.* 2014; 369: 20130526. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0526>
17. Gonzalez-Castillo J., Hoy C.W., Handwerker D., Robinson M.E., Buchanan L.C., Saad Z.S., Bandettini P. Tracking ongoing cognition in individuals using brief, whole-brain functional connectivity patterns. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2015; 112: 8762–8767. <https://doi.org/10.1073/pnas.1501242112>
18. Sadaghiani S., Poline J.-B., Kleinschmidt A., D'Esposito M. Ongoing dynamics in large-scale functional connectivity predict perception. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2015; 112: 8463–8468. <https://doi.org/10.1073/pnas.1420687112>
19. Лебедева И.С., Каледа В.Г., Бархатов А.Н., Абрамова Л.И., Голимбет В.Е., Петрайкин А.В., Семенова Н.А., Ахадов Т.А. Нейрофизиологические маркеры когнитивных нарушений при приступообразной шизофрении. *Психиатрия*. 2010; 4 (46): 7–11.
20. Лурия А.Р. Высшие корковые функции человека. 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1980. 271 с.
21. Lezak M.D. *Neuropsychological Assessment*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1983. <https://doi.org/10.1177/073428298600400111>
22. Семенова О.А. Проблемы исследования функций программирования, регуляции и контроля психической деятельности человека. Обзор литературы. *Физиология человека*. 2005; 6 (31): 106–115.
23. Camilleri J.A., Müller V.I., Fox P., Laird A.R., Hoffstaedter F., Kalenscher T., Eickhoff S.B., Definition and characterization of an extended multiple-demand network. *NeuroImage*. 2018: 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.10.020>
24. Crittenden B.M., Mitchell D.J., Duncan J. Task Encoding across the Multiple Demand Cortex Is Consistent with a Frontoparietal and Cingulo-Opercular Dual Networks Distinction. *J. Neurosci.* 2016; 36 (23): 6147–6155. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.1466-17.2017>
25. Amato M.P., Portaccio E., Goretti B., Zipoli V., Ricchiuti L., De Caro M. F., Patti F., Vecchio R., Sorbi S., Trojano M. The Rao's brief repeatable battery and stroop test: normative values with age, education and gender corrections in an Italian population. *Mult. Scler.* 2006; 12: 787–793. <https://doi.org/10.1177/1352458506070933>
26. Fera F., Nicoletti G., Cerasa A., Romeo N., Gallo O., Gioia M.C., Arabia G., Pugliese P., Zappia M., Quattrone A. Dopaminergic modulation of cognitive interference after pharmacological washout in Parkinson's disease. *Brain Res. Bull.* 2007; 74: 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2007.05.009>
27. Scarpina F., Tagini S. The stroop color and word test. *Front. Psychol.* 2017; 8: 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00557>
28. Langenecker S.A. fMRI of healthy older adults during Stroop interference. *NeuroImage*. 2004; 21: 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.08.027>
29. Glascher J., Adolphs R., Damasio H., Bechara A., Rudrauf D., Calamia M. et al. Lesion mapping of cognitive control and value-based decision making in the prefrontal cortex. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2012; 109: 14681–14686. <https://doi.org/10.1073/pnas.1206608109>
30. Esterman M., Noonan S.K., Rosenberg M., Degutis J. In the zone or zoning out? Tracking behavioral and neural fluctuations during sustained attention. *Cereb. Cortex*. 2013; 23: 2712–2723. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs261>
31. Hellyer P.J., Shanahan M., Scott G., Wise R.J., Sharp D.J., Leech R. The control of global brain dynamics: opposing actions of frontoparietal control and default mode networks on attention. *J. Neurosci.* 2014; 34: 451–461. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.1853-13.2014>



32. Song Y., Hakoda Y. An fMRI study of the functional mechanisms of Stroop/reverse-Stroop effects. *Behav. Brain. Res.* 2015; 290: 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2015.04.047>
33. Ярец М.Ю., Шарова Е.В., Смирнов А.С., Погосбемян Э.Л., Болдырева Г.Н., Зайцев О.С., Ениколопова Е.В. *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова.* 2018; 2 (68): 1–14
34. Burbaud P., Camus O., Caille J.M., Biolac V., Allard M. Influence of individual strategies on brain activation pattern during cognitive tasks. *J. Neuroradiol.* 1999; 26: 59–65. [https://doi.org/10.1016/s0304-3940\(00\)01099-5](https://doi.org/10.1016/s0304-3940(00)01099-5)
35. Sveljo O., Culić M., Koprivšek K., Lučić M. The functional neuroimaging evidence of cerebellar involvement in the simple cognitive task. *Brain Imaging Behav.* 2014; 8 (4): 480–486. <https://doi.org/10.1007/s11682-014-9290-3>
36. Šveljo O., Koprivšek K., Lučić M., Prvulović N. Counting and language. *Prilozi.* 2012; 33 (1): 411–418.
37. Donaldson D.I., Buckner R.L. Effective paradigm design. In: Jezzard, P., Matthews, P.M., Smith, S.M. (Eds.). *Functional MRI, an Introduction to Methods.* Oxford: Oxford University Press, 2003. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780192630711.003.0009>
38. Хомская Е. Д. *Нейропсихология.* 4-е изд. СПб.: Питер, 2005. 496 с.
39. Whitfield-Gabrieli S., Nieto-Castanon A. Conn: A functional connectivity toolbox for correlated and anticorrelated brain networks. *Brain Connectivity.* 2012; 2 (3): 125–141. <https://doi.org/10.1089/brain.2012.0073>
40. Fonov V.S., Evans A.C., McKinsty R.C., Almlí C.R., Collins D.L. Unbiased nonlinear average age-appropriate brain templates from birth to adulthood. *NeuroImage.* 2009; 47 (1): 102. [https://doi.org/10.1016/s1053-8119\(09\)70884-5](https://doi.org/10.1016/s1053-8119(09)70884-5)
41. Stiers P., Goulas A. Functional connectivity of task context representations in prefrontal nodes of the multiple demand network. *Brain Structure and Function.* 2018; 223 (5): 2455–2473. <https://doi.org/10.1007/s00429-018-1638-9>
42. Harrison B.J., Shaw M., Yücel M., Purcell R., Brewer W.J., Strother S.C., Egan G.F., Olver J.S., Nathan P.J., Pantelis C. Functional connectivity during Stroop task performance. *NeuroImage.* 2005; 24 (1): 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.08.033>
43. Anderson J.S., Shah L.M., Nielsen J.A. *Specialty imaging. Functional MRI. First edition.* Amirsys Publishing, Inc, 2014. 298 p.
44. Stoeckel C., Gough P.M., Watkins K.E., Devlin J.T. Supramarginal gyrus involvement in visual word recognition. *Cortex.* 2009; 45 (9): 1091–1096. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2008.12.004>
45. Segal E., Petrides M. Functional activation during reading in relation to the sulci of the angular gyrus region. *Eur. J. Neurosci.* 2013; 38 (5): 2793–2801. <https://doi.org/10.1111/ejn.12277>
46. Seghier M.L. The Angular Gyrus: Multiple Functions and Multiple Subdivisions. *The Neuroscientist.* 2013; 19 (1): 43–61. <https://doi.org/10.1177/1073858412440596>
47. Onitsuka T., Shenton M.E., Salisbury D.F., Dickey C.C., Kasai K., Toner S.K., Frumin M., Kikinis R., Jolesz F.A., McCarley R.W. Middle and Inferior Temporal Gyrus Gray Matter Volume Abnormalities in Chronic Schizophrenia: An MRI Study. *Am. J. Psychiatry.* 2004; 161: 1603–1611. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.161.9.1603>
48. Taylor K.S., Seminowicz D.A., Davis K.D. Two systems of resting state connectivity between the insula and cingulate cortex. *Hum. Brain Mapp.* 2009; 30 (9): 2731–2745. <https://doi.org/10.1002/hbm.20705>
49. Лурья А.П. *Высшие корковые функции человека и их нарушения при локальных поражениях мозга.* М.: Изд-во МГУ, 1962. 431 с.
50. Blummenfeld R.S., Parks C.M., Yonelinas A.P., Ranganath C. Putting the pieces together: the role of dorsolateral prefrontal cortex in relational memory encoding. *J. Cogn. Neurosci.* 2011; 23 (1): 257–265. <https://doi.org/10.1162/jocn.2010.21459>
51. Koechlin E., Hyafil A. Anterior prefrontal function and the limits of human decision making. *Science.* 2007; 318: 594–598. <https://doi.org/10.1126/science.1142995>
52. Warburton E., Wise R.J.S., Price C.J., Weiller C., Hadar U., Ramsay S., Frackowiak R.J.S. Noun and verb retrieval by normal subjects: studies with PET. *Brain.* 1996; 119: 159–179. <https://doi.org/10.1093/brain/119.1.159>

References

1. Krotenkova M.V., Bryukhov V.V., Morozova S.N., Kremneva E.I., Sergeeva A.N., Dreval M.V., Krotenkova I.A., Konovalov R.N., Suslin A.S. State-of-the-art neuroimaging techniques. *Radiologia-praktika.* 2017; 62 (2): 47–63. (In Russian)
2. Kremneva E.I., Zmeykina Ye.A., Morozova S.N., Suslin A.S., Konovalov R.N., Krotenkova M.V. Functional resonance tomography in neurology. М.: IP Martynov, 2016. 90 p. (In Russian)
3. Sharova E.V., Gavron A.A., Abdulaev A.A., Smirnov A.S., Fadeeva L.M., Chelyapina M.V., Zhavoronkova L.A., Boldyreva G.N., Kulikov M.A., Verkhlyutov V.M., Pronin I.N., Kornienko V.N. Resting state fMRI analysis experience using FSL in healthy subjects. *Medical Visualization.* 2017; 4: 6–17. (In Russian)
4. Rozovskaya R.I., Pechenkova E.V., Mershina E.A., Machinskaya R.I. fMRI Study of Retention of Images with Different Emotional Valence in the Working Memory. *Psychology. Journal of the Higher School of Economics.* 2014; 1 (11): 27–48. (In Russian)
5. Kulikova S.N., Peresedova A.V., Krotenkova M.V., Bryukhov V.V., Trifonova O.V., Zavalishin I.A. Longitudinal study of cortical reorganization and structural changes in relapsing remitting multiple sclerosis with hand palsy. *Annals of Clinical and Experimental Neurology = Annaly klinicheskoy i eksperimental'noy neurologii.* 2014; 1 (8): 22–29. (In Russian)
6. Biswal B., Yetkin F.Z., Haughton V.M., Hyde J.S. Functional connectivity in the motor cortex of resting human brain using echo-planar MRI. *Magn. Res. Med.* 1995; 34 (4): 537–541. <https://doi.org/10.1002/mrm.1910340409>
7. Seliverstova E.V., Seliverstov Yu.A., Konovalov R.N., Illarionov S.N. Resting state FMRI: new possibilities for brain physiology and pathology studies. *Annals of Clinical and Experimental Neurology = Annaly klinicheskoy i eksperimental'noy neurologii.* 2013; 4 (7): 39–44. (In Russian)
8. Buchbinder B.R. Functional magnetic resonance imaging. *Handb. Clin. Neurol.* 2016; 135: 61–92. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53485-9.00004-0>
9. Friston K.J., Frith C.D., Fletcher P., Liddle P.F., Frackowiak R.S. Functional topography: multidimensional scaling and functional connectivity in the brain. *Cereb.*



- Cortex*. 1996; 6 (2): 156–164.
<https://doi.org/10.1093/cercor/6.2.156>
10. Friston K.J., Worsley K.J., Frackowiak R.S., Mazziotta J.C., Evans A.C. Assessing the significance of focal activations using their spatial extent. *Hum. Brain Mapp.* 1994; 1 (3): 210–220. <https://doi.org/10.1002/hbm.460010306>
 11. Foster B.L., Rangarajan V., Shirer W.R., Parvizi J. Intrinsic and task-dependent coupling of neuronal population activity in human parietal cortex. *Neuron*. 2015; 86: 578–590. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.03.018>
 12. Cole M., Bassett D., Power J., Braver T., Petersen S. Intrinsic and Task-Evoked Network Architectures of the Human Brain. *Neuron*. 2014; 83: 238–251. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2014.05.014>
 13. Spadone S., Penna S., Sestieri C., Betti V., Tosoni A., Perrucci M., Romani G., Corbetta, M. Dynamic reorganization of human resting-state networks during visuo-spatial attention. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2015; 112: 8112–8117. <https://doi.org/10.1073/pnas.1415439112>
 14. Kaufmann T., Alnæs D., Brandt C., Doan N., Kauppi K. Task modulations and clinical manifestations in the brain functional connectome in 1615 fMRI datasets. *NeuroImage*. 2017; 147: 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.11.073>
 15. Shine J., Bissett P., Bell P., Koyejo O., Balsters J. The dynamics of functional brain networks: Integrated network states during cognitive task performance. *Neuron*. 2016; 92: 544–554. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.09.018>
 16. Krienen F., Yeo T., Buckner R. Reconfigurable task-dependent functional coupling modes cluster around a core functional architecture. *Philosophical Transactions Royal Soc. B. Biol. Sci.* 2014; 369: 20130526. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0526>
 17. Gonzalez-Castillo J., Hoy C.W., Handwerker D., Robinson M.E., Buchanan L.C., Saad Z.S., Bandettini P. Tracking ongoing cognition in individuals using brief, whole-brain functional connectivity patterns. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2015; 112: 8762–8767. <https://doi.org/10.1073/pnas.1501242112>
 18. Sadaghiani S., Poline J.-B., Kleinschmidt A., D'Esposito M. Ongoing dynamics in large-scale functional connectivity predict perception. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2015; 112: 8463–8468. <https://doi.org/10.1073/pnas.1420687112>
 19. Lebedeva I.S., Kaleda V.G., Barkhatova A.N., Abramova L.I., Golimbet V.E., Petryajkin A.V., Semenova N.A., Akhadov T.A. Neuropsychological markers of cognitive disorders in paroxysmal schizophrenia. *Psychiatry*. 2010; 4 (46): 7–11. (In Russian)
 20. Luriya A.R. Highest cortical functions. 2nd. MSU, 1980. 271 p. (In Russian)
 21. Lezak M.D. Neuropsychological Assessment. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1983. <https://doi.org/10.1177/073428298600400111>
 22. Semenova O.A. Problems of studying executive functions of mental activity in humans. *Human physiology*. 2005; 6 (31): 715–723. <https://doi.org/10.1007/s10747-005-0120-2> (In Russian)
 23. Camilleri J.A., Müller V.I., Fox P., Laird A.R., Hoffstaedter F., Kalenscher T., Eickhoff S.B., Definition and characterization of an extended multiple-demand network. *NeuroImage*. 2018; 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.10.020>
 24. Crittenden B.M., Mitchell D.J., Duncan J. Task Encoding across the Multiple Demand Cortex Is Consistent with a Frontoparietal and Cingulo-Opercular Dual Networks Distinction. *J. Neurosci.* 2016; 36 (23): 6147–6155. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.1466-17.2017>
 25. Amato M.P., Portaccio E., Goretti B., Zipoli V., Ricchiuti L., De Caro M. F., Patti F., Vecchio R., Sorbi S., Trojano M. The Rao's brief repeatable battery and stroop test: normative values with age, education and gender corrections in an Italian population. *Mult. Scler.* 2006; 12: 787–793. <https://doi.org/10.1177/1352458506070933>
 26. Fera F., Nicoletti G., Cerasa A., Romeo N., Gallo O., Gioia M.C., Arabia G., Pugliese P., Zappia M., Quattrone A. Dopaminergic modulation of cognitive interference after pharmacological washout in Parkinson's disease. *Brain Res. Bull.* 2007; 74: 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2007.05.009>
 27. Scarpina F., Tagini S. The stroop color and word test. *Front. Psychol.* 2017; 8: 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00557>
 28. Langenecker S.A. fMRI of healthy older adults during Stroop interference. *NeuroImage*. 2004; 21: 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.08.027>
 29. Glascher J., Adolphs R., Damasio H., Bechara A., Rudrauf D., Calamia M. et al. Lesion mapping of cognitive control and value-based decision making in the prefrontal cortex. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2012; 109: 14681–14686. <https://doi.org/10.1073/pnas.1206608109>
 30. Esterman M., Noonan S.K., Rosenberg M., Degutis J. In the zone or zoning out? Tracking behavioral and neural fluctuations during sustained attention. *Cereb. Cortex*. 2013; 23: 2712–2723. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs261>
 31. Hellyer P.J., Shanahan M., Scott G., Wise R.J., Sharp D.J., Leech R. The control of global brain dynamics: opposing actions of frontoparietal control and default mode networks on attention. *J. Neurosci.* 2014; 34: 451–461. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.1853-13.2014>
 32. Song Y., Hakoda Y. An fMRI study of the functional mechanisms of Stroop/reverse-Stroop effects. *Behav. Brain. Res.* 2015; 290: 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2015.04.047>
 33. Yarets M.Yu., Sharova E.V., Smirnov A.S., Pogosbekyan Ye.L., Boldyreva G.N., Zaytsev O.S., Enikolopova O.S. Structural and functional organization of counting in executive functions examination. *I.P. Pavlov Journal of Higher Nervous Activity = Zh Vyssh Nerv Deiat IP Pavlova*. 2018; 2 (68): 1–14 (In Russian)
 34. Burbaud P., Camus O., Caille J.M., Biolac B., Allard M. Influence of individual strategies on brain activation pattern during cognitive tasks. *J. Neuroradiol.* 1999; 26: 59–65. [https://doi.org/10.1016/s0304-3940\(00\)01099-5](https://doi.org/10.1016/s0304-3940(00)01099-5)
 35. Sveljo O., Culić M., Koprivšek K., Lučić M. The functional neuroimaging evidence of cerebellar involvement in the simple cognitive task. *Brain Imaging Behav.* 2014; 8 (4): 480–486. <https://doi.org/10.1007/s11682-014-9290-3>
 36. Šveljo O., Koprivšek K., Lučić M., Prvulović N. Counting and language. *Prilozi*. 2012; 33 (1): 411–418.
 37. Donaldson D.I., Buckner R.L. Effective paradigm design. In: Jezzard, P., Matthews, P.M., Smith, S.M. (Eds.). *Functional MRI, an Introduction to Methods*. Oxford: Oxford University Press, 2003. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780192630711.003.0009>
 38. Khomskaya E.D., Neuropsykhologiya. 4th. SPb.: Piter, 2005. 496 p. (In Russian)
 39. Whitfield-Gabrieli S., Nieto-Castanon A. Conn: A functional connectivity toolbox for correlated and anticorrelated



- brain networks. *Brain Connectivity*. 2012; 2 (3): 125–141. <https://doi.org/10.1089/brain.2012.0073>
40. Fonov V.S., Evans A.C., McKinsty R.C., Almlí C.R., Collins D.L. Unbiased nonlinear average age-appropriate brain templates from birth to adulthood. *NeuroImage*. 2009; 47 (1): 102. [https://doi.org/10.1016/s1053-8119\(09\)70884-5](https://doi.org/10.1016/s1053-8119(09)70884-5)
41. Stiers P., Goulas A. Functional connectivity of task context representations in prefrontal nodes of the multiple demand network. *Brain Structure and Function*. 2018; 223 (5): 2455–2473. <https://doi.org/10.1007/s00429-018-1638-9>
42. Harrison B.J., Shaw M., Yücel M., Purcell R., Brewer W.J., Strother S.C., Egan G.F., Olver J.S., Nathan P.J., Pantelis C. Functional connectivity during Stroop task performance. *NeuroImage*. 2005; 24 (1): 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.08.033>
43. Anderson J.S., Shah L.M., Nielsen J.A. Specialty imaging. Functional MRI. First edition. Amirsys Publishing, Inc, 2014. 298 p.
44. Stoekel C., Gough P.M., Watkins K.E., Devlin J.T. Supramarginal gyrus involvement in visual word recognition. *Cortex*. 2009; 45 (9): 1091–1096. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2008.12.004>
45. Segal E., Petrides M. Functional activation during reading in relation to the sulci of the angular gyrus region. *Eur. J. Neurosci*. 2013; 38 (5): 2793–2801. <https://doi.org/10.1111/ejn.12277>
46. Seghier M.L. The Angular Gyrus: Multiple Functions and Multiple Subdivisions. *The Neuroscientist*. 2013; 19 (1): 43–61. <https://doi.org/10.1177/1073858412440596>
47. Onitsuka T., Shenton M.E., Salisbury D.F., Dickey C.C., Kasai K., Toner S.K., Frumin M., Kikinis R., Jolesz F.A., McCarley R.W. Middle and Inferior Temporal Gyrus Gray Matter Volume Abnormalities in Chronic Schizophrenia: An MRI Study. *Am. J. Psychiatry*. 2004; 161: 1603–1611. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.161.9.1603>
48. Taylor K.S., Seminowicz D.A., Davis K.D. Two systems of resting state connectivity between the insula and cingulate cortex. *Hum. Brain Mapp*. 2009; 30 (9): 2731–2745. <https://doi.org/10.1002/hbm.20705>
49. Luria A.R. Higher Cortical Functions in Man. Moscow University Press, 1962. Library of Congress Number: 65-11340. (In Russian)
50. Blummenfeld R.S., Parks C.M., Yonelinas A.P., Ranganath C. Putting the pieces together: the role of dorsolateral prefrontal cortex in relational memory encoding. *J. Cogn. Neurosci*. 2011; 23 (1): 257–265. <https://doi.org/10.1162/jocn.2010.21459>
51. Koechlin E., Hyafil A. Anterior prefrontal function and the limits of human decision making. *Science*. 2007; 318: 594–598. <https://doi.org/10.1126/science.1142995>
52. Warburton E., Wise R.J.S., Price C.J., Weiller C., Hadar U., Ramsay S., Frackowiak R.J.S. Noun and verb retrieval by normal subjects: studies with PET. *Brain*. 1996; 119: 159–179. <https://doi.org/10.1093/brain/119.1.159>

Для корреспонденции*: Морозова Софья Николаевна – 125367 Москва, Волоколамское шоссе, д. 80. ФГБНУ “НЦН”. Тел.: 8-905-743-99-98. E-mail: kulikovasn@gmail.com

Морозова Софья Николаевна – канд. мед. наук, научный сотрудник отделения лучевой диагностики ФГБНУ “НЦН”, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-9093-344X>

Кремнева Елена Игоревна – канд. мед. наук, старший научный сотрудник отделения лучевой диагностики ФГБНУ “НЦН”, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-9396-6063>

Гаджиева Зухра Шарапудиновна – канд. мед. наук, врач-невролог 3-го неврологического отделения ФГБНУ “НЦН”, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-7498-4063>

Ахметзянов Булат Митхатович – канд. мед. наук, врач-рентгенолог, обособленное подразделение Филиал ООО “ПЭТ-Технолоджи”, Уфа. <https://orcid.org/0000-0003-4461-3338>

Кротенкова Марина Викторовна – доктор мед. наук, заведующая отделением лучевой диагностики ФГБНУ “НЦН”, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-3820-4554>

Добрынина Лариса Анатольевна – доктор мед. наук, заведующая 3 неврологическим отделением ФГБНУ “НЦН”, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-9929-2725>

Contact*: Sofya N. Morozova – 80, Volokolamskoye shosse, 125367, Moscow, Russia. Research Center of Neurology. Phone: +7-905-743-99-98. E-mail: kulikovasn@gmail.com

Sofya N. Morozova – Cand. of Sci. (Med.), research fellow in radiology department, Research center of neurology, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-9093-344X>

Elena I. Kremneva – Cand. of Sci. (Med.), major research fellow in radiology department, Research center of neurology, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-9396-6063>

Zukhra Sh. Gadzhieva – Cand. of Sci. (Med.), neurologist of 3rd neurological department, Research center of neurology, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-7498-4063>

Bulat M. Akhmetzyanov – Cand. of Sci. (Med.), radiologist, “PET-Technology” LLC, Ufa, Russia. <https://orcid.org/0000-0003-4461-3338>

Marina V. Krotenkova – Doct. of Sci. (Med.), head of the radiology department, Research center of neurology, Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-3820-4554>

Larisa A. Dobrynina – Doct. of Sci. (Med.), head of the 3rd neurological department, Research center of neurology, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-9929-2725>