

УДК 616-073.75

DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar623485>

Научная статья



Функциональная магнитно-резонансная томография в состоянии покоя: особенности статистической обработки данных ROI-анализа

Ш.К. Абдулаев, Д.А. Тарумов, К.В. Маркин, А.А. Устюжина

Военно-медицинская академия, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Во многих работах для исследования внутри- и межсетевых связей используют метод построения нейросетей — анализ на основе зон интереса. Противоречивые результаты, получаемые при оценке коннективности головного мозга с использованием анализа на основе зон интереса, можно объяснить методологическими различиями, связанными со статистической обработкой данных функциональной магнитно-резонансной томографии. В связи с этим актуально проведение исследования со сравнительной оценкой различных статистических методов анализа на основе зон интереса в обработке данных функциональной магнитно-резонансной томографии в состоянии покоя.

Цель исследования: оценить функциональную связность основных нейросетей покоя головного мозга при анализе на основе зон интереса с применением различных статистических подходов.

Материалы и методы. Проведен анализ данных 15 функциональных магнитно-резонансных томографий в состоянии покоя головного мозга пациентов без неврологической и психической патологии. Функциональное магнитно-резонансное исследование выполнялось на сканере Philips Ingenia 1,5 Тл с использованием последовательности градиентной эхо-планарной визуализации. Для построения нейросетей применен анализ на основе зон интереса. Статистическую обработку данных выполняли с помощью методов функциональной сетевой коннективности, пространственной парной кластеризации, основанной на анализе рандомизации/перестановки, и улучшения беспорогового кластера.

Результаты. Количество связей между структурами сетей головного мозга, зафиксированных при использовании метода функциональной сетевой коннективности, равно 280, пространственной парной кластеризации — 186, улучшения беспорогового кластера — 182. Интересный факт заключается в том, что отрицательные связи выявлены только при использовании параметрической статистики.

Заключение. Выполнена сравнительная оценка методов статистической обработки данных функциональной магнитно-резонансной томографии при проведении анализа на основе зон интереса. Метод функциональной сетевой коннективности на основе многомерной параметрической статистики оказался информативнее, чем пространственная парная кластеризация, основанная на анализе перестановок/рандомизации, и метод, основанный на улучшении беспорогового кластера. Несмотря на возрастающую в последние годы популярность функциональной магнитно-резонансной томографии в состоянии покоя в исследовании функциональной активности и коннективности головного мозга, нет стандартизированных алгоритмов построения его нейросетей.

Ключевые слова: нейросети покоя; ROI-анализ; статистика; фМРТ в состоянии покоя.

Как цитировать

Абдулаев Ш.К., Тарумов Д.А., Маркин К.В., Устюжина А.А. Функциональная магнитно-резонансная томография в состоянии покоя: особенности статистической обработки данных ROI-анализа // Известия Российской военно-медицинской академии. 2024. Т. 43. № 1. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar623485>

DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar623485>

Research Article

Resting-state functional magnetic resonance imaging: features of statistical processing of ROI-analysis data

Shamil' K. Abdulaev, Dmitriy A. Tarumov, Kirill V. Markin, Aleksandra A. Ustyuzhina

Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: In many works, to study intra- and inter-network connections, a method for constructing networks is used — ROI-analysis (region of interest analysis). The conflicting results obtained when assessing brain connectivity using ROI-analysis can be explained by methodological differences associated with the statistical processing of fMRI data. In this regard, it is relevant to conduct a study with a comparative assessment of various statistical methods of ROI-analysis in processing resting state fMRI data.

AIM: to assess the functional connectivity of the main resting state networks of the brain using ROI-analysis using various statistical approaches.

MATERIALS AND METHODS: We analyzed data from 15 resting-state fMRI studies of the brain of patients without neurological and mental pathology. fMRI scanning was performed on a Phillips Ingenia 1.5 T scanner using a gradient echo-planar imaging (EPI-BOLD) sequence. ROI-analysis was used to build networks. Statistical data processing was performed using methods: functional network connectivity, randomization/permutation spatial pairwise clustering statistics, and threshold-free cluster enhancement.

RESULTS: The number of connections between the structures of brain networks recorded using the method of functional network connectivity is 280, spatial pairwise clustering — 186, threshold-free cluster enhancement — 182. An interesting fact is that negative connections were identified only when using parametric statistics.

CONCLUSION: A comparative assessment of methods for statistical processing of fMRI data during ROI-analysis was carried out. The functional network connectivity method based on multivariate parametric statistics turned out to be more informative than randomization/permutation spatial pairwise clustering statistics and the method based on threshold-free cluster enhancement. Despite the growing popularity in recent years of resting-state fMRI in the study of functional activity and connectivity of the brain, there are no standardized algorithms for constructing networks of the brain.

Keywords: resting-state networks; resting-state fMRI; ROI-analysis; statistics.

To cite this article

Abdulaev ShK, Tarumov DA, Markin KV, Ustyuzhina AA. Resting-state functional magnetic resonance imaging: features of statistical processing of ROI-analysis data. *Russian Military Medical Academy Reports*. 2024;43(1):5–12. DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar623485>

Received: 16.11.2023

Accepted: 26.12.2023

Published: 29.03.2024

DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar623485>

研究文章

静息状态下的功能磁共振成像：ROI分析数据统计处理的特点

Shamil' K. Abdulaev, Dmitriy A. Tarumov, Kirill V. Markin, Aleksandra A. Ustyuzhina

Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia

简评

现实意义。在许多研究中，使用构建神经网络的方法来研究网络内和网络间的联系——基于感兴趣区域的分析。使用兴趣区分析法评估大脑连通性时获得的结果相互矛盾，这可以用功能磁共振成像数据统计处理方法上的差异来解释。因此，在处理静息状态下的功能磁共振成像数据时，有必要对基于兴趣区的不同统计分析方法进行比较评估。

本研究的目的是评估主要静息状态下大脑神经网络的功能连接性，根据感兴趣的区域，采用不同的统计方法进行分析。

材料和方法。我们对15名无神经和精神疾病患者的大脑静息状态下的功能磁共振成像数据进行了分析。功能性磁共振成像是在1.5 TL Phillips Ingenia扫描仪上使用梯度回波平面成像序列进行的。在构建神经网络时采用了基于兴趣区的分析方法。统计数据处理采用了功能网络连接、基于随机化/重排分析的空间成对聚类和无角聚类增强等方法。

结果。使用功能网络连接法记录的大脑网络结构之间的连接数量为280个，空间成对聚类为186个，无角聚类增强为182个。一个有趣的事实是，只有在使用参数统计时负联系才会被识别出来。

结论。对基于兴趣区分析中功能磁共振成像数据的统计处理方法进行了比较评估。事实证明，基于多元参数统计的功能网络连接方法比基于置换/随机分析的空间成对聚类方法和基于无角聚类增强的方法信息量更大。尽管近年来静息状态下的功能磁共振成像在大脑功能活动和连接性研究中越来越受欢迎，但目前还没有构建其神经网络的标准算法。

关键词：静息神经网络；ROI分析；统计学；静息态fMRI。

To cite this article

Abdulaev ShK, Tarumov DA, Markin KV, Ustyuzhina AA. 静息状态下的功能磁共振成像：ROI分析数据统计处理的特点. *Russian Military Medical Academy Reports*. 2024;43(1):5–12. DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar623485>

收到: 16.11.2023

接受: 26.12.2023

发布日期: 29.03.2024

АКТУАЛЬНОСТЬ

Функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ) в состоянии покоя представляет собой уникальную методику для изучения патофизиологии заболеваний, связанных с нарушением функциональной деятельности головного мозга [1–3], основанную на регистрации степени насыщения крови кислородом в локальном участке мозга (BOLD-сигнала). В последнее время исследователи выдвигают гипотезы, в соответствии с которыми в основе многих неврологических и психических заболеваний лежит патологическая связность между нейросетями покоя [4, 5]. Нейросети покоя — термин, который относится к пространственно независимым структурам головного мозга, способным к согласованным активациям без конкретных задач или стимулов, участвующих в выполнении различных когнитивных функций, обнаружении, обработке и интеграции внутренних и внешних стимулов, а также психических процессов [6, 7]. В современных нейробиологических исследованиях выделяют 8 основных нейросетей покоя [8–10]:

1. Сеть пассивного режима работы: медиальная префронтальная кора, задняя поясная кора/предклинье, нижний отдел теменной доли с обеих сторон.
2. Сенсомоторная сеть: верхняя (дополнительная моторная кора медиальных отделов лобных долей), двусторонняя латеральная (моторная и сенсорная кора с обеих сторон).
3. Зрительная сеть: медиальная, затылочная и латеральные подсети.
4. Сеть выявления значимости: передняя поясная кора, островок, ростральная префронтальная кора и супрамargинальная извилина.
5. Дорсальная сеть внимания: фронтальное поле зрения и внутритеменная борозда.
6. Сеть исполнительного контроля (синоним: лобно-теменная сеть): дорсолатеральная префронтальная и задняя теменная кора с обеих сторон.
7. Речевая сеть: нижние лобные извилины и задние отделы верхней височной извилины с обеих сторон.
8. Мозжечковая сеть: передняя и задняя доли мозжечка.

Во многих работах для исследования внутри- и межсетевых связей используют метод построения нейросетей как анализ на основе зон интереса (ROI-анализ). Противоречивые результаты, получаемые при оценке связности головного мозга с использованием ROI-анализа, можно объяснить методологическими различиями, связанными со статистической обработкой данных фМРТ. Воспроизводимость научных результатов имеет большое значение для получения валидных научных данных. Главным образом различия наблюдаются при выборе метода статистического анализа нейросетей.

Наиболее популярными методами статистической обработки данных при ROI-анализе являются: параметрическая статистика на основе функциональной сетевой

коннективности; непараметрическая статистика, основанная на анализе рандомизации/перестановки — пространственная парная кластеризация; непараметрическая статистика, основанная на улучшении беспорогового кластера [11].

На данный момент отсутствуют научные работы с применением нескольких методов статистической обработки к одному набору данных. В связи с этим является актуальным проведение исследования со сравнительной оценкой различных статистических методов ROI-анализа в обработке данных фМРТ в состоянии покоя.

Цель исследования — оценить функциональную связность основных нейросетей покоя головного мозга при ROI-анализе с применением различных статистических подходов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Производился ретроспективный анализ результатов 15 фМРТ-исследований в состоянии покоя головного мозга, взятых из базы данных кафедры рентгенологии и радиологии (с курсом ультразвуковой диагностики) Военно-медицинской академии. По результатам анализа отобраны МР-исследования пациентов без неврологической и психической патологии. Функциональное МР-сканирование выполнялось в отделении МРТ на сканере Phillips Ingenia 1,5 Тл. Изображения фМРТ в состоянии покоя были получены с использованием EPI-BOLD: время повторения (TR) = 3000 мс, время эха (TE) = 50 мс, поле зрения (FOV) = 250 мм, угол поворота (FA) = 90°, матрица = 128 × 128, толщина среза = 4 мм, зазор между срезами = 0,6 мм, 280 объемов. T1-взвешенные данные высокого разрешения (структурные изображения) были получены с использованием последовательности 3D-TFE (TR = 7,5 мс, TE = 3,5 мс, FA = 8°, матрица = 256 × 256, толщина среза = 1,2 мм, объем 1).

Все данные были проанализированы с помощью нейровизуализационных программ MATLAB, CONN 21a, SPM 12 [12]. Предварительная обработка включала функциональное выравнивание и развертывание, коррекцию синхронизации срезов, прямую функциональную сегментацию и нормализацию в системе координат пространства Монреальского неврологического института, а также функциональное пространственное сглаживание с использованием ядра Гаусса шириной 8 мм. Выбросы (артефакты BOLD-сигнала) идентифицировались с помощью набора инструментов ART, если они отличались более чем на 3 стандартных отклонения от средней интенсивности изображения. Стратегия шумоподавления на базе анатомических компонентов (aCompCor) отсеивала ложные источники шума (например, физиологические) [13]. Затем была применена полосовая фильтрация с частотным окном 0,01–0,1 Гц.

После всех процессов предобработки выполнялся ROI-анализ для определения функциональной связности между нейросетями головного мозга. Она количественно

определялась путем расчета корреляций (коэффициента корреляции Пирсона) между временными рядами изменения BOLD-сигнала по всему мозгу.

Для статистической обработки данных ROI-анализа нами применялись:

1. Метод функциональной сетевой коннективности (Functional Network Connectivity — FNC) на основе многомерной параметрической статистики [14]. Процесс начинается с определения интересующих сетей. Далее FNC анализирует весь набор связей между всеми парами ROI внутри и между сетями, выполняя многомерный параметрический анализ общей линейной модели всех соединений, входящих в каждый из этих наборов (кластеров) связей. Для окончательной оценки отдельных кластеров используется скорректированное p -значение с поправкой на ожидаемую долю ложных отклонений (коэффициент Бенджамини–Хохберга, FDR) на уровне кластера ($p < 0,05$) для выбора из всех наборов межсетевых подключений тех, которые считаются значимыми, вместе с нескорректированным p -значением порога высоты (уровня соединения) ($p < 0,05$), чтобы охарактеризовать структуру отдельных соединений в пределах каждого значимого набора.

2. Непараметрическая статистика на основе рандомизации/перестановки — пространственная парная кластеризация (Spatial Pairwise Clustering — SPC) [15]. Процесс начинается с матрицы, оцененной с использованием общей линейной модели. Сети в этой матрице сортируются либо вручную пользователем (например, из атласа), либо автоматически с использованием процедуры иерархической кластеризации [16]. Далее с помощью порога «высоты» ($p < 0,001$) определяется статистическая параметрическая карта. Полученные надпороговые области определяют серию непересекающихся кластеров. Каждый кластер характеризуется своей массой (суммой квадрата F- или T-статистики по всем соединениям внутри каждого кластера), затем они сравниваются с распределением ожидаемых значений массы кластера при нулевой гипотезе, которое численно оценивается с использованием множественных (1000 или более) итераций рандомизации/перестановки исходных данных. Для оценки отдельных кластеров используются нескорректированное p -значение на уровне кластера ($p < 0,01$) и p -значение с поправкой на ожидаемую долю ложных отклонений (FDR) на уровне кластера ($p < 0,05$) для выбора из всех кластеров тех, которые считаются значимыми.

3. Непараметрическая статистика на основе улучшения беспорогового кластера (Threshold Free Cluster Enhancement — TFCE) [17]. Подобно анализу пространственной парной кластеризации, TFCE начинается со всей матрицы, оцененной с использованием общей линейной модели, при этом сети снова сортируются либо вручную, либо автоматически. Вместо определения статистической параметрической карты с использованием порога высоты анализ продолжается путем вычисления соответствующей

карты оценок TFCE, объединяя силу статистического эффекта для каждого соединения с размером всех кластеров. Затем ожидаемое распределение значений TFCE при нулевой гипотезе численно оценивается с использованием нескольких (1000 или более) итераций рандомизации/перестановки исходных данных. Для выбора из всех кластеров тех, которые считаются значимыми, применяется p -значение с поправкой на групповую вероятность ошибки (FWE) на уровне кластера ($p < 0,05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам применения различных методов статистической обработки получены матрицы коннективности, позволяющие судить о меж- и внутрисетевых связях (рис. 1, 2). При использовании метода функциональной сетевой коннективности визуальная и сенсомоторная сети имеют положительные связи между собой и с сетью внимания и отрицательные — с сетями пассивного режима работы и исполнительного контроля (рис. 1). У сети внимания отмечаются положительные связи с сетями выявления значимости, визуальной и сенсомоторной; отрицательные — с сетями пассивного режима работы, исполнительного контроля, языковой и мозжечковой. Для мозжечковой сети данная связь единственная. Сеть выявления значимости взаимодействует с сетями внимания, исполнительного контроля и языковой, все связи имеют положительную корреляцию. Языковая сеть положительно функционально связана с сетями выявления значимости и исполнительного контроля и отрицательно — с сетью внимания. С сетью пассивного режима работы языковая сеть имеет связи как с прямой, так и с обратной корреляцией. Сети пассивного режима работы и исполнительного контроля связаны между собой, с сетями внимания, визуальной, сенсомоторной и языковой. Кроме того, сеть исполнительного контроля связана еще и с сетью выявления значимости.

При применении методов непараметрической статистики выявлены следующие отличительные особенности в отличие от параметрического метода: визуальная, сенсомоторная сети и сеть внимания не имеют связей с сетями пассивного режима работы и исполнительного контроля (рис. 2). При этом у сети внимания отсутствует коннективность с языковой и мозжечковой сетями. Сеть пассивного режима работы связана только с сетью исполнительного контроля. Вышеописанные сети имеют одинаковую коннективность при SPC и TFCE, в остальных сетях, функциональная связность которых представлена в таблице, результаты разнятся.

Количество связей между структурами сетей головного мозга, зафиксированных при использовании метода функциональной сетевой коннективности, равно 280, пространственной парной кластеризации — 186, улучшения беспорогового кластера — 182. Интересный факт заключается в том, что отрицательные связи выявлены только

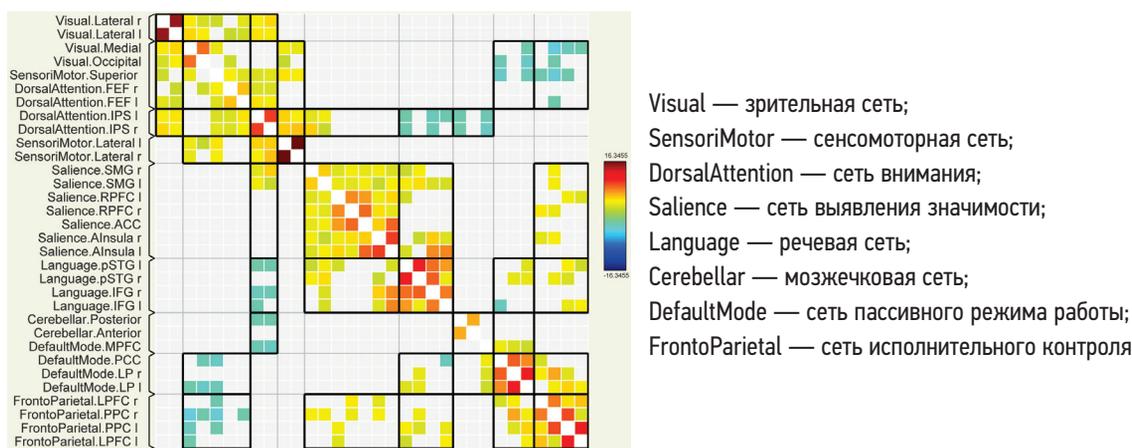
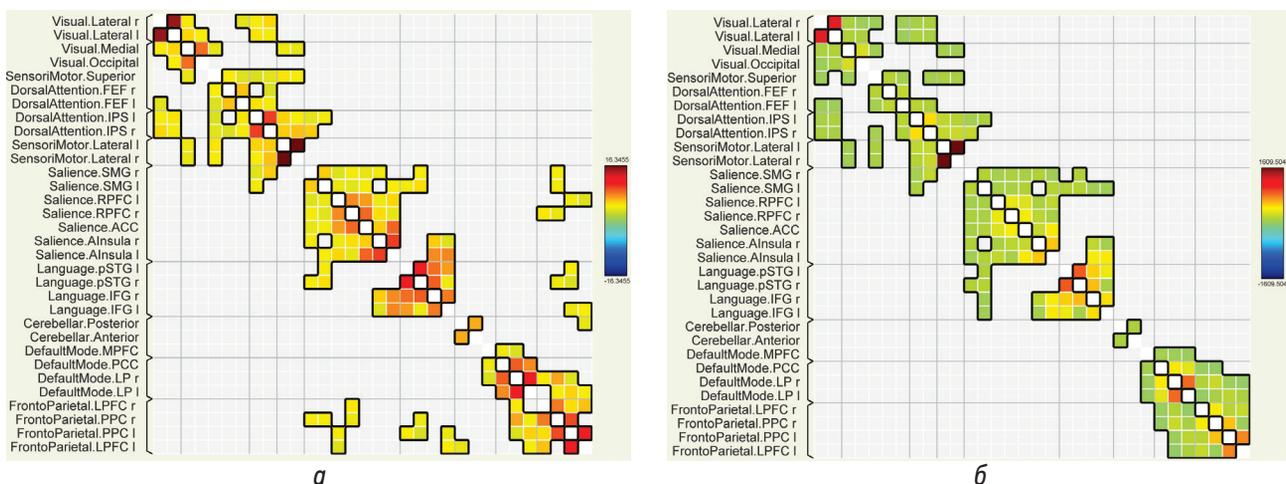


Рис. 1. Матрица коннективности при использовании метода многомерной параметрической статистики на основе функциональной сетевой коннективности (FCN)

Fig. 1. Connectivity matrix using the method of multivariate parametric statistics based on functional network connectivity (FCN)



Visual — зрительная сеть; SensoriMotor — сенсомоторная сеть; DorsalAttention — сеть внимания;
Salience — сеть выявления значимости; Language — речевая сеть; Cerebellar — мозжечковая сеть;
DefaultMode — сеть пассивного режима работы; FrontoParietal — сеть исполнительного контроля

Рис. 2. Матрица коннективности при использовании методов непараметрической статистики на основе: *a* — анализа рандомизации/перестановки — пространственная парная кластеризация (SPC); *b* — улучшения беспорогового кластера (TFCE)

Fig. 2. Connectivity matrix using non-parametric statistics methods based on: *a* — randomization/permutation spatial pairwise clustering (SPC); *b* — threshold free cluster enhancement (TFCE)

Таблица. Коннективность нейросетей головного мозга при использовании методов непараметрической статистики

Table. Connectivity of brain networks using nonparametric statistics methods

Нейросети покоя	SPC	TFCE
Сеть выявления значимости	Сеть внимания, языковая сеть, сеть исполнительного контроля	Сеть внимания, языковая сеть
Языковая сеть	Сеть выявления значимости, сеть исполнительного контроля	Сеть выявления значимости
Мозжечковая сеть	Сеть исполнительного контроля	—
Сеть исполнительного контроля	Мозжечковая сеть, сенсомоторная сеть, сеть внимания, языковая сеть, сеть пассивного режима работы	Сеть пассивного режима работы

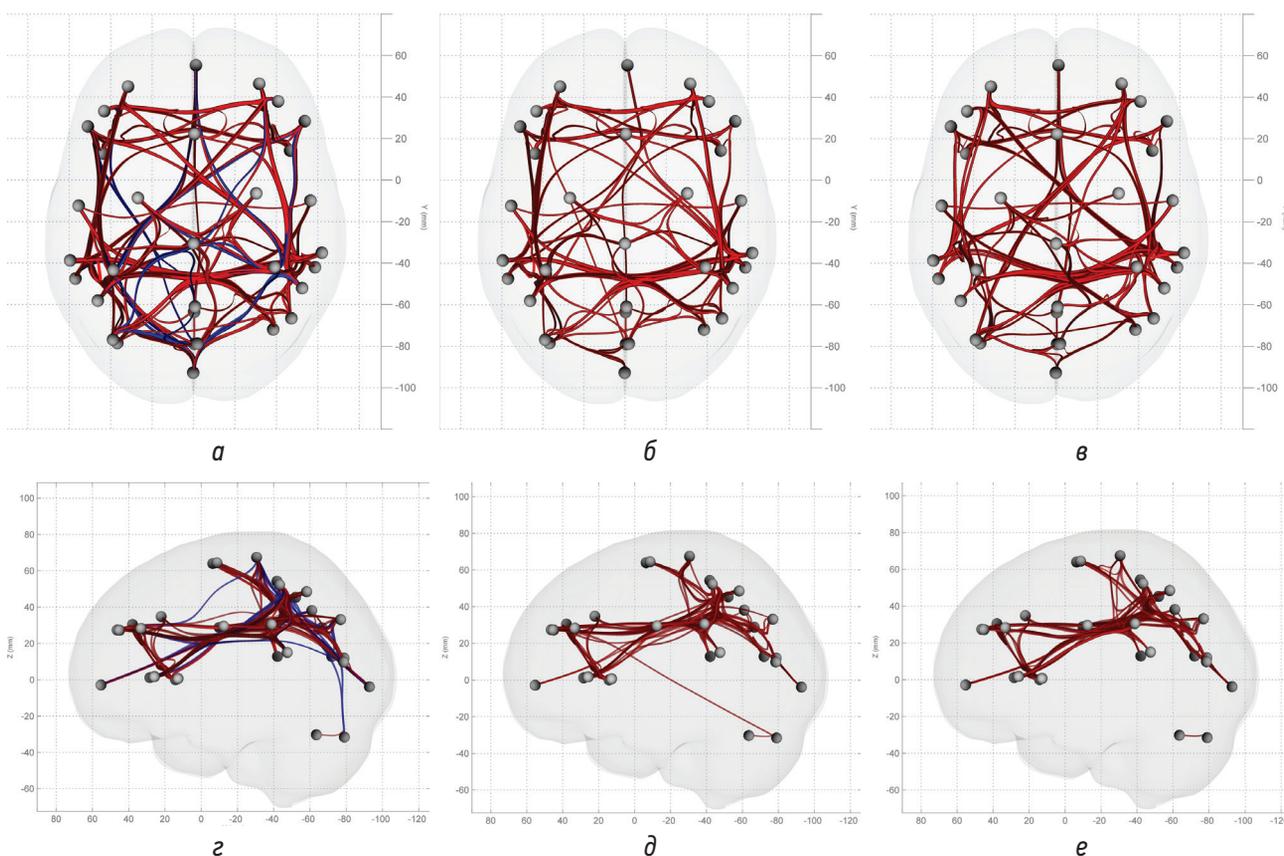


Рис. 3. Пространственное изображение функциональных связей нейросетей покоя головного мозга при использовании методов статистики обработки: *а, г* — функциональная сетевая связность (FCN); *б, д* — анализ рандомизации/перестановки — пространственная парная кластеризация (SPC); *в, е* — улучшение беспорогового кластера (TFCE)

Fig. 3. Spatial image of the functional connections of the resting state networks of the brain using processing statistics methods: *а, г* — functional network connectivity (FCN); *б, д* — randomization/permutation spatial pairwise clustering (SPC); *в, е* — threshold free cluster enhancement (TFCE)

при использовании параметрической статистики (рис. 3). Отрицательные корреляции несут важную информацию, так как они свидетельствуют об угнетении одной сети при активации другой. Об антикоррелированности сетей свидетельствует и набирающая популярность теория тройной сетевой модели [5].

В большинстве работ, связанных с изучением нейросетей головного мозга, авторы не указывают примененный метод статистической обработки. Разнонаправленные результаты данных фМРТ в состоянии покоя могут быть связаны с различными методическими подходами к ней. Как показано в нашей работе, выбор того или иного статистического метода к одному набору данных оказывает значительное влияние на результаты исследования.

Несмотря на большее количество связей, выявленных с помощью метода параметрической статистики, нельзя однозначно утверждать его преимущество перед непараметрическими методами. Остается неуточненным вопрос, какую информацию дадут рассмотренные методы при межгрупповой обработке, когда потребуется сравнить данные фМРТ пациентов с какой-либо патологией и контрольной группы, что требует дальнейших исследований в данном направлении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на возрастающую в последние годы популярность фМРТ в состоянии покоя в исследовании функциональной активности и связности головного мозга, нет стандартизированных алгоритмов построения его нейросетей. Имеются различные методы анализа функциональной интеграции и сегрегации головного мозга, каждый из которых в итоге несет уникальную информацию. Вместе с тем каждый из этих методов имеет свои особенности в статистической обработке данных.

Метод функциональной сетевой связности на основе многомерной параметрической статистики позволяет определить большее количество функциональных связей по сравнению с непараметрическими методами. Важной особенностью данного метода является выявление связей с отрицательной корреляцией. В ходе нашего исследования среди непараметрических методов пространственная парная кластеризация, основанная на анализе рандомизации/перестановки, оказалась информативнее метода, основанного на улучшении беспорогового кластера.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Финансирование данной работы не проводилось.

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Этическая экспертиза. Исследование выполнено в рамках диссертационного исследования и одобрено локальным этическим комитетом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кремнева Е.И., Синицын Д.О., Добрынина Л.А., и др. Функциональная МРТ покоя в неврологии и психиатрии // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2022. Т. 122, № 2. С. 5–14. EDN: FWPFIM doi: 10.17116/jnevro20221220215
2. Абдулаев Ш.К., Тарумов Д.А., Шамрей В.К., и др. Функциональные нарушения в крупномасштабных сетях покоя головного мозга при опиоидной наркомании // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2023. Т. 123, № 5. С. 165–170. EDN: SWMZBG doi: 10.17116/jnevro2023123051165
3. Ублинский М.В., Семенова Н.А., Манжурцев А.В., и др. Исследование нарушений функциональных связей между сетью пассивного режима работы мозга и структурами мозжечка у пациентов с легкой черепно-мозговой травмой в острой стадии по данным фМРТ состояния покоя // Медицинская визуализация. 2020. Т. 24, № 2. С. 131–137. EDN: OEKXCT doi: 10.24835/1607-0763-2020-2-131-137
4. Friston K., Brown H.R., Siemerkus J., Stephan K.E. The dysconnection hypothesis // *Schizophr. Res.* 2016. Vol. 176, N. 2–3. P. 83–94. doi: 10.1016/j.schres.2016.07.014
5. Menon V. Large-scale brain networks and psychopathology: a unifying triple network model // *Trends Cogn. Sci.* 2011. Vol. 15, N. 10. P. 483–506. doi: 10.1016/j.tics.2011.08.003
6. Littow H., Huossa V., Karjalainen S., et al. Aberrant functional connectivity in the default mode and central executive networks in subjects with schizophrenia — a whole-brain resting-state ICA study // *Front. Psychiatry.* 2015. Vol. 6. P. 26. doi: 10.3389/fpsy.2015.00026
7. Bastos-Leite A.J., Ridgway G.R., Silveira C., et al. Dysconnectivity within the default mode in first-episode schizophrenia: a stochastic dynamic causal modeling study with functional magnetic resonance imaging // *Schizophr. Bull.* 2015. Vol. 41, N. 1. P. 144–153. doi: 10.1093/schbul/sbu080
8. Rong B., Huang H., Gao G., et al. Widespread intra- and inter-network dysconnectivity among large-scale resting state networks in schizophrenia // *J. Clin. Med.* 2023. Vol. 12, N. 9. P. 3176. doi: 10.3390/jcm12093176
9. Kornelsen J., Wilson A., Labus J.S., et al. Brain resting-state network alterations associated with crohn's disease // *Front. Neurol.* 2020. Vol. 11. P. 48. doi: 10.3389/fneur.2020.00048
10. Буккиева Т.А., Чегина Д.С., Ефимцев А.Ю., и др. Функциональная МРТ покоя. Общие вопросы и клиническое применение // Российский электронный журнал лучевой диагностики. 2019. Т. 9, № 2. С. 150–170. EDN: IKLSOY doi: 10.21569/2222-7415-2019-9-2-150-170
11. Nieto-Castanon A. Handbook of functional connectivity Magnetic Resonance Imaging methods in CONN. Boston, MA: Hilbert Press, 2020. ISBN: 978-0-578-64400-4 doi: 10.56441/hilbertpress.2207.6598
12. Whitfield-Gabrieli S., Nieto-Castanon A. Conn: a functional connectivity toolbox for correlated and anticorrelated brain networks // *Brain Connect.* 2012. Vol. 2, N. 3. P. 125–141. doi: 10.1089/brain.2012.0073
13. Behzadi Y., Restom K., Liu J., Liu T.T. A component based noise correction method (CompCor) for BOLD and perfusion based FMRI // *Neuroimage.* 2007. Vol. 37, N. 1. P. 90–101. doi: 10.1016/j.neuroimage.2007.04.042
14. Jafri M.J., Pearlson G.D., Stevens M., Calhoun V.D. A method for functional network connectivity among spatially independent resting state components in schizophrenia // *Neuroimage.* 2008. Vol. 39, N. 4. P. 1666–1681. doi: 10.1016/j.neuroimage.2007.11.001
15. Zalesky A., Fornito A., Bullmore E.T. Network-based statistic: identifying differences in brain networks // *Neuroimage.* 2010. Vol. 53, N. 4. P. 1197–1207. doi: 10.1016/j.neuroimage.2010.06.041
16. Bar-Joseph Z., Gifford D.K., Jaakkola T.S. Fast optimal leaf ordering for hierarchical clustering // *Bioinformatics.* 2001. Vol. 17, suppl. 1. S22–S29. EDN: ILDQBF doi: 10.1093/bioinformatics/17.suppl_1.s22
17. Smith S.M., Nichols T.E. Threshold-free cluster enhancement: addressing problems of smoothing, threshold dependence and localisation in cluster inference // *Neuroimage.* 2009. Vol. 44, N. 1. P. 83–98. doi: 10.1016/j.neuroimage.2008.03.061

REFERENCES

1. Kremneva EI, Sinitsyn DO, Dobryнина LA, et al. Resting state functional MRI in neurology and psychiatry. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry.* 2022;122(2):5–14. (In Russ.) EDN: FWPFIM doi: 10.17116/jnevro20221220215
2. Abdulaev ShK, Tarumov DA, Shamrey VK, et al. Functional impairments in large-scale brain projects in opioid addiction. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry.* 2023;123(5):165–170. (In Russ.) EDN: SWMZBG doi: 10.17116/jnevro2023123051165
3. Ublinskiy MV, Semenova NA, Manzhurtsev AV, et al. Dysfunction of cerebellum functional connectivity between default mode network and cerebellar structures in patients with mild traumatic brain injury in acute stage. rsfMRI study. *Medical Visualization.* 2020;24(2):131–137. (In Russ.) EDN: OEKXCT doi: 10.24835/1607-0763-2020-2-131-137
4. Friston K, Brown HR, Siemerkus J, Stephan KE. The dysconnection hypothesis. *Schizophr Res.* 2016;176(2–3):83–94. doi: 10.1016/j.schres.2016.07.014

5. Menon V. Large-Scale brain networks and psychopathology: a unifying triple network model. *Trends Cogn Sci.* 2011;15(10): 483–506. doi: 10.1016/j.tics.2011.08.003
6. Littow H, Huossa V, Karjalainen S, et al. Aberrant functional connectivity in the default mode and central executive networks in subjects with schizophrenia — a whole-brain resting-state ICA study. *Front Psychiatry.* 2015;6:26. doi: 10.3389/fpsy.2015.00026
7. Bastos-Leite AJ, Ridgway GR, Silveira C, et al. Dysconnectivity within the default mode in first-episode schizophrenia: a stochastic dynamic causal modeling study with functional magnetic resonance imaging. *Schizophr Bull.* 2015;41(1):144–153. doi: 10.1093/schbul/sbu080
8. Rong B, Huang H, Gao G, et al. Widespread intra- and inter-network dysconnectivity among large-scale resting state networks in schizophrenia. *J Clin Med.* 2023;12(9):3176. doi: 10.3390/jcm12093176
9. Kornelsen J, Wilson A, Labus JS, et al. Brain resting-state network alterations associated with crohn's disease. *Front Neurol.* 2020;11:48. doi: 10.3389/fneur.2020.00048
10. Bukkieva TA, Chegina DS, Efimtsev AY, et al. Resting state functional MRI. General issues and clinical application. *Russian Electronic Journal of Radiology.* 2019;9(2):150–170. (In Russ.) EDN: IKLSOY doi: 10.21569/2222-7415-2019-9-2-150-170
11. Nieto-Castanon A. *Handbook of functional connectivity Magnetic Resonance Imaging methods in CONN.* Boston, MA: Hilbert Press; 2020. doi: 10.56441/hilbertpress.2207.6598
12. Whitfield-Gabrieli S, Nieto-Castanon A. Conn: A Functional connectivity toolbox for correlated and anticorrelated brain networks. *Brain Connect.* 2012;2(3):125–141. doi: 10.1089/brain.2012.0073
13. Behzadi Y, Restom K, Liao J, Liu TT. A Component based noise correction method (CompCor) for BOLD and perfusion based fMRI. *Neuroimage.* 2007;37(1):90–101. doi: 10.1016/j.neuroimage.2007.04.042
14. Jafri MJ, Pearlson GD, Stevens M, Calhoun VD. A method for functional network connectivity among spatially independent resting state components in schizophrenia. *Neuroimage.* 2008;39(4): 1666–1681. doi: 10.1016/j.neuroimage.2007.11.001
15. Zalesky A, Fornito A, Bullmore ET. Network-based statistic: identifying differences in brain networks. *Neuroimage.* 2010;53(4): 1197–1207. doi: 10.1016/j.neuroimage.2010.06.041
16. Bar-Joseph Z, Gifford DK, Jaakkola TS. Fast optimal leaf ordering for hierarchical clustering. *Bioinformatics.* 2001;17(suppl 1):S22–S29. EDN: ILDQBF doi: 10.1093/bioinformatics/17.suppl_1.s22
17. Smith SM, Nichols TE. Threshold-free cluster enhancement: addressing problems of smoothing, threshold dependence and localisation in cluster inference. *Neuroimage.* 2009;44(1):83–98. doi: 10.1016/j.neuroimage.2008.03.061

ОБ АВТОРАХ

***Шамиль Казимагомедович Абдулаев;** адрес: Россия, 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; Scopus Author ID: 58314274300; ORCID: 0000-0002-5126-4212; eLibrary SPIN: 1322-3690

Дмитрий Андреевич Тарумов, докт. мед. наук, доцент; Scopus Author ID: 56561933300; ORCID: 0000-0002-9874-5523; eLibrary SPIN: 7608-5045

Кирилл Валерьевич Маркин; Scopus Author ID: 57739070400; ORCID: 0000-0002-6242-1279; eLibrary SPIN: 5416-7490

Александра Аркадьевна Устюжина; ORCID: 0009-0003-7282-0163

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

***Shamil' K. Abdulaev;** address: 6, Akademika Lebedeva str., Saint Petersburg, 194044, Russia; Scopus Author ID: 58314274300; ORCID: 0000-0002-5126-4212; eLibrary SPIN: 1322-3690

Dmitriy A. Tarumov, MD, Dr. Sci. (Medicine), Associate Professor; Scopus Author ID: 56561933300; ORCID: 0000-0002-9874-5523; eLibrary SPIN: 7608-5045

Kirill V. Markin; Scopus Author ID: 57739070400; ORCID: 0000-0002-6242-1279; eLibrary SPIN: 5416-7490

Aleksandra A. Ustyuzhina; ORCID: 0009-0003-7282-0163;