

КОГНИТИВНЫЕ И СОЦИОГУМАНИТАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 612.821; 616.8

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ДАННЫХ фМРТ-ИССЛЕДОВАНИЙ НА ГРУППОВОМ УРОВНЕ

© 2023 г. В. А. Орлов^{1,*}, Д. Г. Малахов¹, С. И. Карташов¹,
М. В. Ковальчук¹, Ю. И. Холодный¹

¹Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*E-mail: Orlov_VA@nrcki.ru

Поступила в редакцию 05.09.2023 г.

После доработки 05.09.2023 г.

Принята к публикации 27.10.2023 г.

фМРТ-исследования различной целевой направленности осуществляются на различных по количеству участников группах лиц, при этом традиционно используется групповая оценка получаемых фМРТ-данных, результаты которой зависят от ряда факторов. В рамках исследований “технологической” направленности, ориентированных на совершенствование системы оценки фМРТ-данных (в том числе на индивидуальном уровне), было признано целесообразным изучить различные варианты групповой оценки таких данных при различных критериях их значимости.

DOI: 10.56304/S2782375X23030129

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт” (НИЦ “КИ”) осуществляет нейрокогнитивные исследования различной целевой направленности, используя метод функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ), дополненный регистрацией (с помощью МРТ-совместимого полиграфа (МРТсП)) динамики физиологических реакций исследуемого человека. Создание комплексного метода фМРТ-МРТсП-исследования [1, 2] позволило провести цикл экспериментов и заложить основы новой области отечественной нейронауки – нейрокриминалистики. Эти исследования дали возможность получить результаты, которые оказались полезными для фундаментальной науки и для выполнения научно-прикладных работ (например, в области медицины). Выполненные эксперименты наглядно показали необходимость совершенствования методических и аппаратно-программных средств фМРТ-МРТсП-исследований [3, 4], т.е. развития “технологического” направления исследований. При этом был сделан вывод об определенной ограниченности возможностей оценки фМРТ-данных на групповом уровне и указано на необходимость поиска путей и создания методов оценки фМРТ-данных на индивидуальном уровне [5–7], поскольку такая оценка имеет ключевое значение для развития и расширения использования метода фМРТ на практике, например в прикладной нейрокрими-

налистике и решении ряда задач медицинской практики.

Начатые в рамках исследований “технологического” направления работы по созданию одного из способов оценки на индивидуальном уровне данных, получаемых в ходе фМРТ, привели к созданию метода воксельной зоново-стимульной оценки (ВЗС-оценки) фМРТ-данных [8], который прошел испытание в экспериментальных условиях и показал свою перспективность.

Для дальнейшей разработки системы оценок фМРТ-данных на индивидуальном уровне было признано целесообразным внимательнее изучить итоги групповых оценок фМРТ-данных, полученных от одной и той же выборки исследованных лиц при различных критериях их значимости.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При изучении особенностей результатов фМРТ, получаемых на групповом уровне, анализу были подвергнуты фМРТ-данные, полученные в ходе фМРТ-МРТсП-исследования с использованием теста парадигмы скрываемой информации (активно применяемого в криминалистике) – теста со скрываемым именем (ТСИ), который моделирует сокрытие человеком личностно значимой для него информации, сохраняемой в его памяти на протяжении всей жизни. Не останавливаясь на технологии проведения ТСИ (подробное описание порядка его реализации представлено в [9]), отметим лишь, что в условиях фМРТ-МРТсП-

исследования этот тест длился около 6–7 мин и содержал 30 стимулов, 25 из которых обеспечивали получение фМРТ-данных, подлежащих дальнейшей обработке.

В ходе экспериментов МРТ-данные регистрировались томографом 3 Tesla SIEMENS Magnetom Verio MR. Для получения структурного T1-взвешенного сагиттального 3D-изображения использовалась последовательность быстрого градиентного эха с параметрами: 176 срезов, TR = 1900 мс, TE = 2.19 мс, толщина среза = 1 мм, угол поворота = 90°, время инверсии = 900 мс, FOV = 250 мм × 218 мм². Данные фМРТ были получены с параметрами: 51 срез, TR = 1110 мс, TE = 24 мс, толщина среза = 2 мм, угол поворота = 90°, FOV = 192 × 192 мм².

Эксперименты проводили с использованием сверхбыстрых последовательностей сканирования (TR = 1110 мс), поскольку такой режим способствовал повышению чувствительности методики исследования и обеспечивал приемлемый компромисс между качеством фМРТ-данных и размером области сканирования [5].

Данные функциональной и структурной МРТ были обработаны с использованием программного пакета SPM12 [10]. После конвертирования DICOM-файлов в NIFTI-формат все изображения центрировали вручную в передней комиссуре. Изображения EPI скорректировали на неоднородность магнитного поля с помощью Field-Map-тулбокса для SPM12, а также выполнили временную коррекцию сигналов фМРТ-данных, необходимость применения которой определяли выбором событийно связанной схемы эксперимента.

Анатомические и функциональные данные были нормированы в ICBM-стереотаксическую систему отсчета, а функциональные — сглажены с использованием гауссова фильтра с ядром 6 × 6 × 6 мм³ FWHM.

Участниками фМРТ-МРТсП-экспериментов являлись студенты (36 мужчин и 36 женщин) в возрасте 21–23 лет, которые сообщили об отсутствии у них каких-либо заболеваний на момент участия в исследовании. Ранее уже было отмечено [9] влияние гендерного фактора на фМРТ-данные, регистрируемые в ходе фМРТ-МРТсП-исследования при реализации тестов в парадигме скрываемой информации. Этот факт определил необходимость формирования для данного исследования двух равных по количеству групп участников экспериментов мужского и женского пола.

Разрешение на проведение фМРТ-МРТсП-экспериментов было предоставлено этическим комитетом НИЦ “КИ”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В связи с намеченным планом исследовать особенности результатов, получаемых после обработки фМРТ-данных на групповом уровне, было признано целесообразным рассмотреть результаты, полученные на единой выборке таких данных (72 участника экспериментов), а затем рассмотреть результаты каждой из групп (36 мужчин и 36 женщин).

В ходе этого исследования формировали групповые статистические карты с разными критериями их выделения, которыми были выбраны вероятности выделения: 1) $p < 0.001$, 5%; 2) $p < 0.05$ FWE, 1%; 3) $p < 0.05$ FWE, 2.5%; 4) $p < 0.05$ FWE, 5%.

Отметим, что выборки мужчин и женщин (каждая по 36 чел.) состояли из двух частей — “предварительной” (13 чел.) и “основной” (23 чел.), которые также были оценены порознь.

Некоторые из результатов оценки указанных выборок фМРТ-данных представлены в табл. 1, они позволили установить следующее.

1. Применение, видимо, наиболее “жесткого” из существующих критериев — $p < 0.05$ FWE, 5% — к фМРТ-данным, полученным на выборке из 72 чел., позволило (графа 1) выделить 42 из 132 (т.е. 31.8%) зон мозга (от лобных долей до мозжечка), которые были вовлечены в процесс сокрытия значимой для человека информации в ходе ТСИ. Групповые статистические карты активности мозга показаны на рис. 1.

2. Применение менее “жесткого” и наиболее часто применяемого при оценке фМРТ-данных критерия — $p < 0.001$, 5% — к тем же данным той же выборки (72 чел.) позволило (графа 2) выделить 72 зоны мозга (т.е. 54.5% зон или на 71.4% больше, чем с помощью первого критерия). Групповые статистические карты активности мозга (при $p < 0.001$, 5%) представлены на рис. 2.

3. Помимо оценок, показанных в пп. 1 и 2, в исследовательских целях были применены “промежуточные” критерии (пп. 2 и 3), которые обычно не используют при оценке фМРТ-данных. Если взять за основу оценку фМРТ-данных при $p < 0.001$ 5% (графа 2), то при оценке с критерием $p < 0.05$ FWE 1% не выделились 11 (отмечены знаком “1”) из 72 зон. При оценке с критерием $p < 0.05$ FWE 2.5% в дополнение к 11 не выделились еще 9 зон. Таким образом, динамика выделения зон мозга при ужесточении критериев оценки составила 72 (п. 2), 61, 52 и 42 зоны (п. 1).

4. Далее из общего массива фМРТ-данных (72 чел.) были выделены данные, полученные от мужчин (36 чел.) и оценены при двух критериях — $p < 0.001$ 5% и $p < 0.05$ FWE 5%: итоги оценки представлены в графе 3. Как следует из табл. 1, оценка фМРТ-данных мужчин с критерием $p < 0.001$ 5% (обозначено звездочкой) в 90% случаев совпадает с оценкой фМРТ-данных с тем же кри-

Таблица 1

Зона	Количество вокселей	Аббревиатуры зон	Группы сравнения						Зона	Количество вокселей	Аббревиатуры зон	Группы сравнения						Зона	Количество вокселей	Аббревиатуры зон	Группы сравнения																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
			1	2	3	4	5	6				1	2	3	4	5	6				1	2	3	4	5	6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
1	8125	FP r			*	*			45	iLOC r							2052	89	SCC 1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																</

Таблица 1. Окончание

Зона	Количество вокселей	Аббревиатуры зон	Группы сравнения						Зона	Количество вокселей	Аббревиатуры зон	Группы сравнения						Зона	Количество вокселей	Аббревиатуры зон	Группы сравнения																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
			1	2	3	4	5	6				1	2	3	4	5	6				1	2	3	4	5	6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
27	331	aITG r							71	876	pTFusC l									115	1248	Cereb6 l																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									

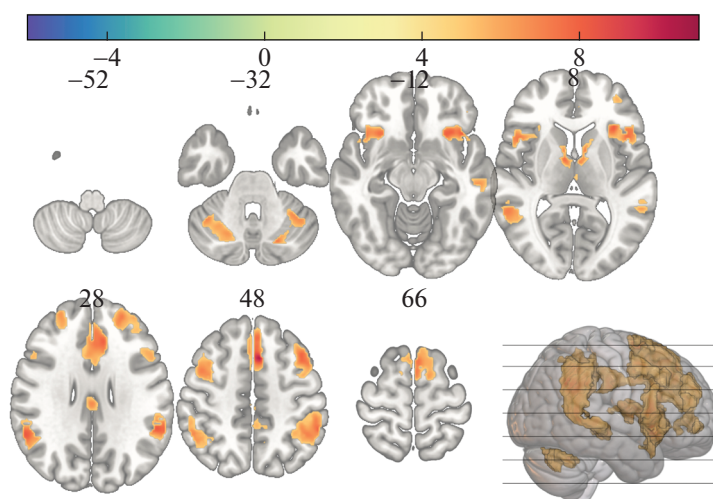


Рис. 1. Групповые статистические карты (статистика Стьюдента) $p < 0.05$ с поправкой на множественные сравнения.

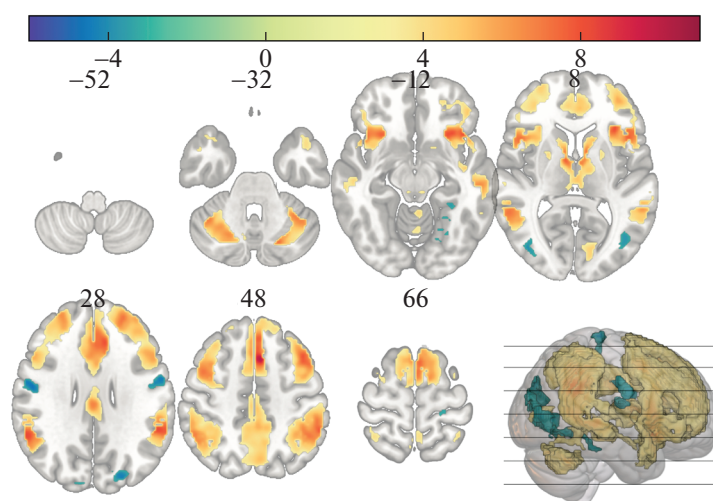


Рис. 2. Групповые статистические карты (статистика Стьюдента) $p < 0.001$ без дополнительных поправок.

териум, полученных на выборке в 72 чел.: выделилось 65 зон.

Оценка фМРТ-данных мужчин с критерием $p < 0.05$ FWE 5% (обозначено крестиком) совпадает с оценкой фМРТ-данных с тем же критерием, полученных на выборке в 72 чел., лишь в 43% случаев: выделилось 18 зон.

5. Оценка фМРТ-данных женщин (36 чел.) с критерием $p < 0.05$ FWE, 5% не выявила выделившихся зон мозга, а с критерием $p < 0.001$, 5% (графа 4, обозначено решеткой) удалось выделить 38 зон, т.е. лишь 58% от числа активных зон у мужчин.

6. Оценка фМРТ-данных “основной” выборки мужчин (23 чел.) с критерием $p < 0.001$, 5% (графа 5, отмечено звездочкой) выделяет 58 зон

мозга, что составляет 89% от объема выделившихся зон в выборке из 36 чел.

7. Оценка фМРТ-данных “основной” выборки женщин (23 чел.) с критерием $p < 0.001$, 5% (графа 6, отмечено решеткой) выделяет 27 зон мозга, что составляет 71% от объема выделившихся зон в женской выборке из 36 чел. и лишь 42% от объема выделившихся зон в мужской выборке из 36 чел.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в табл. 1 результаты обработки фМРТ-данных при различных критериях их оценки позволяют сделать следующие выводы.

Таблица 1 наглядно без каких-либо дополнительных вычислений показывает, что активность

зон мозга у женщин при выполнении ТСИ явно ниже, чем у мужчин; об этом же свидетельствует сказанное в пп. 4–6.

Ряд зон мозга человека (например, 5–6, 11–12, 25–26, 38–42 и др.) устойчиво проявляют активность в ходе выполнения ТСИ вне зависимости от величины и гендерного состава выборки, в то время как активность иных зон (например, 2, 10, 19, 24, 102 и др.) носит нестабильный, гендерно-зависимый характер.

Представленная обработка фМРТ-данных подтверждает установленное ранее при проведении нейрокогнитивных исследований требование [11] о строгом, по возможности, соблюдении социально-возрастной и гендерной однородности изучаемой выборки лиц.

Выполненное в итоге данного исследования определение устойчиво реагирующих (с учетом гендерного фактора) зон мозга является весьма полезным для дальнейшего совершенствования создаваемого в НИЦ “КИ” метода ВЗС-оценки фМРТ-данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковальчук М.В., Холодный Ю.И., Карташов С.И. и др. // Вестник Военного инновационного технополиса “ЭРА”. 2020. Т. 1. № 1. С. 112.
2. Kovalchuk M.V., Kholodny Y.I. // Adv. Intel. Syst. Comp. 2020. P. 260. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-25719-4>
3. Малахов Д.Г., Лисицин И.С., Скитева Л.И., Холодный Ю.И. // Вестник Военного инновационного технополиса “ЭРА”. 2021. Т. 2. № 2. С. 125.
4. Орлов В.А., Холодный Ю.И. // Вестник Военного инновационного технополиса “ЭРА”. 2022. Т. 3. № 1. С. 91.
5. Ковальчук М.В., Карташов С.И., Орлов В.А., Холодный Ю.И. // Вестник Военного инновационного технополиса “ЭРА”. 2021. Т. 2. № 4. С. 103.
6. Ковальчук М.В., Холодный Ю.И., Орлов В.А. и др. // Вестник Военного инновационного технополиса “ЭРА”. 2022. Т. 3. № 2. С. 213.
7. Орлов В.А., Малахов Д.Г., Карташов С.И. и др. // Вестник Военного инновационного технополиса “ЭРА”. 2022. Т. 3. № 2. С. 218.
8. Орлов В.А., Карташов С.И., Ковальчук М.В., Холодный Ю.И. // Вестник Военного инновационного технополиса “ЭРА”. 2023. (в печати).
9. Холодный Ю.И., Малахов Д.Г., Орлов В.А. и др. // Экспериментальная психология. 2021. Т. 14. № 3. С. 17.
10. Ashburner J. et al. SPM12 Manual. London: UCL Queen Square Institute of Neurology, 2020. URL: <https://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/doc/manual.pdf> (Accessed 9.07.2021).
11. Bruni T. Cross-cultural variation and fMRI lie-detection // Technologies on the stand: Legal and ethical questions in neuroscience and robotics. 2012. P. 129.