

КОГНИТИВНЫЕ И СОЦИОГУМАНИТАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 612.821; 616.8

ОЦЕНКА фМРТ-ДАНЫХ НА ИНДИВИДУАЛЬНОМ УРОВНЕ

© 2023 г. В. А. Орлов^{1,*}, 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.

Представлены результаты исследований, направленных на создание воксельной зонаво-стимульной оценки фМРТ-данных на индивидуальном уровне, а также некоторые факторы, влияющие на формирование таких оценок. На базе экспериментальных данных, полученных в криминалистических тестах парадигмы сокрытия информации, показана необходимость дальнейшего изучения возможностей предложенного метода анализа фМРТ-данных на индивидуальном уровне.

DOI: 10.56304/S2782375X23030117

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа является продолжением исследований, проводимых в Национальном исследовательском центре “Курчатовский институт” (НИЦ “КИ”) и ориентированных на изучение нейрокогнитивных процессов, в том числе лежащих в основе диагностики у человека скрываемой им информации [1].

Известно, что изучение возможности применения функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) для выявления лжи человека было начато в 2001 г. [2]. Дальнейшие исследования [3, 4] привлекли внимание ученых и специалистов различного профиля, способствовали развитию нейронауки и формированию в ней самостоятельной отрасли fMRI-based lie detection (fMRI-BLD). В США в 2006 г. были созданы две коммерческие фирмы [5], которые начали оказывать услуги по проведению fMRI-BLD и представлять получаемые результаты в суд в качестве доказательств [6]. Однако возможность использования метода fMRI-BLD не имела требуемого экспериментального обоснования, в связи с чем деятельность фирм была подвергнута резкой критике [7, 8], а сам метод перестал применяться на практике.

Анализ научных публикаций [5, 6, 9–11] показал, что одним из важнейших оснований для критики использования fMRI-BLD на практике явилось то, что подавляющее количество исследований по данной тематике проводилось в парадигме дифференциации лжи (differentiation of deception (DoD) paradigm), носило фундаментальный характер, а результаты таких исследований были получены на групповом уровне (т.е. на группах участников экспериментов). Фундаментальные

исследования, бесспорно, важны для развития науки, однако их результаты, получаемые на групповом уровне, не могут автоматически переноситься на индивидуальный уровень. Как следствие, такие результаты имеют малую ценность для решения практических задач (например, в медицине или криминалистике), когда требуется оценивать динамику нейрокогнитивных процессов конкретного человека.

Помимо этого, результаты исследований, полученных в рамках DoD-парадигмы, в силу процессуальных норм, существующих в России и многих странах мира, исключают использование получаемых с их помощью результатов в интересах криминалистики [12].

В 2005–2009 гг. в области fMRI-BLD были выполнены исследования в DoD-парадигме и в парадигме сокрытия информации (concealed information (CI) paradigm) с оценкой полученных фМРТ-данных на индивидуальном уровне [13–16], что имело принципиальное значение для применения технологии фМРТ-исследований в прикладных целях, в частности в области криминалистики и медицины.

Однако в 2010 г. в США было опубликовано руководство для судей, в котором указывалось, что исследования на групповом уровне “имеют ограниченное влияние на то, может ли фМРТ выявлять ложь на уровне отдельного субъекта или индивидуального вопроса”. Как следствие, пособие для судей констатировало, что “нет соответствующих опубликованных данных, которые однозначно отвечали бы на вопрос, могут ли методы нейробиологии, основанные на фМРТ, обнаруживать ложь на уровне отдельного субъекта” [9].

Методические сложности реализации fMRI-BLD на практике были хорошо известны специалистам [17], и в 2015 г. был сделан вывод, что “фМРТ может быть использована для отличия лжи от правды применимо только к групповым сравнениям в очень контролируемых условиях, а не к конкретным индивидуумам. Это один из самых серьезных недостатков использования МРТ в судебных разбирательствах: неспособность предоставить регион или изменение сигнала, которые могут представлять “ложь” отдельных лиц” [6]. Такой вывод, фактически, делал метод фМРТ применимым исключительно в фундаментальных исследованиях и закрывал возможность его использования в прикладной практике.

Ни в коей мере не отрицая замечаний, высказанных в адрес технологии фМРТ [6], тем не менее, следует отметить, что указанный выше вывод о невозможности оценки на индивидуальном уровне реагирования человека на конкретный стимул является, по-видимому, излишне категоричным.

Проводимые в НИЦ “КИ” нейрокогнитивные исследования в области нейрокриминалистики ориентированы на практическое использование их результатов. Поэтому одним из основных направлений этих исследований стала адаптация возможностей фМРТ под потребности практики, в частности на разработку метода оценки фМРТ-данных на индивидуальном уровне.

Проведенные исследования позволили создать МРТ-совместимый полиграф (МРТсП), на который был получен патент [18]. С помощью этого прибора разработана технология комплексного фМРТ-МРТсП-исследования, показавшая свою эффективность и внедренная в экспериментальную практику [19].

Феномен нейроваскулярного взаимодействия, лежащий в основе метода фМРТ и заключающийся в региональном изменении кровотока в ответ на активацию близлежащих нейронов, прямо указывал на способ оценки активности зон мозга путем подсчета количества обнаруженных в ходе статистического анализа при заданном пороге вокселей в этих зонах.

При обработке фМРТ-данных в целях их групповых и индивидуальных оценок традиционно используется так называемый разностный подход [20], согласно которому для выявления специфических к тому или иному виду когнитивной деятельности регионов проводится статистическое сравнение сигналов во время предъявления “целевого” стимула и некоего “фонового” или базового стимула. Иными словами, “фундаментальной концепцией функциональной нейровизуализации является статистическое сравнение того, что, как ожидается, произойдет с гемодинамической реакцией (кровотоком) в связи с определенной функцией” [6].

Поэтому была выдвинута гипотеза, что в случае создания воксельной (т.е. измеряемой в вокселях) оценки фМРТ-данных, регистрируемых при реагировании человека на каждый из поданных стимулов (с формированием так называемых β -значений) от каждой из зон мозга, структурированных по атласу CONN (<https://web.conn-toolbox.org/>) в системе координат MNI (Montreal Neurological Institute) пространства, появится возможность ранжирования предъявленных упомянутых стимулов по их субъективной значимости для конкретного человека. Так зародилась идея создания метода воксельной зонально-стимульной оценки (ВЗС-оценки) фМРТ-данных на индивидуальном уровне, пригодного для решения практических задач, например, в области нейрокриминалистики или медицины.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для разработки метода ВЗС-оценки взяли фМРТ-данные, полученные в ходе используемого в криминалистике теста со скрываемым именем (ТСИ), во время которого испытуемый скрывал от исследователя свое собственное имя, предъявляемое в ряду других имен.

Предобработку фМРТ-данных проводили на основе свободно распространяемого программного пакета SPM12 и специально разработанных терминальных скриптов системы MacOS. Структурные и функциональные данные приводили к центру в передней комиссуре вручную. Далее проводили расчет и коррекцию артефактов движения. С помощью записанных во время исследования карт неоднородности магнитного поля была проведена коррекция функциональных данных с целью удаления артефактов магнитной восприимчивости. Структурные и функциональные МРТ-объемы были нормализованы на шаблонные изображения в MNI-пространстве. Для регистрации фМРТ использовали мультисрезовые (ультрабыстрые) последовательности [21], полученные в НИЦ “КИ” на МР-томографе Siemens Magnetom Verio 3T. Ультрабыстрые последовательности для получения фМРТ-данных имеют более высокое временное разрешение, а потому более чувствительны [19]. Использование мультисрезовых последовательностей для регистрации фМРТ приводит к появлению физиологических и аппаратных вкладов в шум. Такие вклады приводят к некорректной статистической оценке активации нейронных сетей. Для их детекции и подавления использовали MELODIC – МНК, реализованный в программном пакете FSL. Данный шаг реализуется в три этапа: разложение сигнала на независимые компоненты, классификация компонент, удаление шумовых компонент. На последнем этапе предобработки был применен Гауссов фильтр с ядром $6 \times 6 \times 6$ мм³. Данный

Таблица 1. Фрагмент таблицы с результатами оценки фМРТ-данных, полученных в итоге проведения ТСИ и обработанных методом ВЗС-оценки

Номер зоны	Название зоны (атлас CONN)	Количество вокселей	Номер стимула				
			1	2	3	4	5
....
7	<i>MidFG r</i>	2734	9	28	0	266	0
8	<i>MidFG l</i>	2958	0	19	0	290	0
9	<i>IFG tri r</i>	546	0	0	0	173	0
10	<i>IFG tri l</i>	654	5	0	0	177	0
11	<i>IFG oper r</i>	695	11	3	0	100	0
12	<i>IFG oper l</i>	765	1	0	0	210	0
....
76	<i>FO r</i>	311	0	0	0	6	0
77	<i>FO l</i>	354	0	0	0	51	0
78	<i>CO r</i>	890	0	8	5	67	7
79	<i>CO l</i>	972	0	145	99	188	41
80	<i>PO r</i>	530	0	43	7	85	18
81	<i>PO l</i>	564	3	109	71	211	26
....
А	Σ		143	1409	832	15592	284
Б	Σ актив.		143	1409	795	13416	259
В	Σ дезактив		0	0	37	2176	25
Г	Σ актив.-Б		80	149	85	684	65
Д	Σ дезактив		0	0	30	405	12
Е	Σ актив.-С		0	205	161	658	66
Ж	Σ дезактив		0	0	0	46	0
З	Σ актив.-М		0	0	73	273	0
И	Σ дезактив		0	0	0	7	0

шаг позволяет исключить появление случайных одиночных статистически значимых выбросов при параметрическом картировании. Процедура пространственного размытия интенсивностей трехмерным гауссовым фильтром является традиционным этапом подготовки данных к статистическому анализу.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Статистическое параметрическое картирование реализовано в программном продукте SPM 8 (Statistical Parametric Mapping). Статистическое параметрическое картирование – это воксельный подход, использующий классический статистический вывод, чтобы дать информацию о локальных специфических ответах на факторы воздействия в ходе эксперимента и тем самым связать наблюдаемый ответ с определенной структурой мозга или участком коры. Статистические параметрические карты – это результат обработки

пикселей изображения, значения которых при нулевой гипотезе распределены согласно известной функции плотности вероятности. Обычно используются распределение Стьюдента и F -распределение. Чаще их называют T - и F -картами. За прошедшие годы статистическое параметрическое картирование пришло к тому, что необходимо использовать теорию общей линейной модели (GLM) для анализа и классических выводов о пространственном распределении данных с помощью статистических параметрических карт. Теория GLM используется для оценки некоторых параметров, которые могли бы описать пространственно-непрерывные данные точно так же, как при обычном анализе описываются дискретные данные. Статистический анализ изображений соответствует моделированию данных с целью наблюдения нейрофизиологических ответов из различных частей области интереса и выводам об отношении величин интересующих эффектов к дисперсии ошибки. Этот классический вывод можно рас-

смаивать как прямое сравнение дисперсии за счет экспериментальных манипуляций с ошибкой дисперсии (F -статистика и другие вероятностные отношения). Кроме того, можно рассматривать статистический подход как отношение оценки ответа или отклонения другой интересующей величины к оценке его стандартного отклонения (T -статистика).

Основным приемом для изучения нейрокогнитивных функций человека с помощью GLM служит так называемый разностный подход [22], при котором сравниваются статистические параметры GLM, рассчитанные для каждой из групп анализируемых стимулов. В данной работе для получения результирующих статистических карт использовали оценку степени похожести экспериментальных данных на модельные (сконструированные с помощью канонической функции гемодинамического ответа и временной дизайн-матрицей эксперимента).

Для иллюстрации приведен фрагмент полученного результата обработки фМРТ-данных ТСИ (табл. 1) методом ВЗС-оценки: скрываемое имя – стимул 4. В столбцах 1–5 представлено количество вокселей, зарегистрированных на каждый стимул в каждой из зон мозга (по атласу CONN; количество вокселей в каждой из зон мозга указано в третьем столбце). Видно, что значимый стимул 4 вызывает более сильную активацию в указанных зонах, чем другие (1–3 и 5) стимулы: например, в зоне 9 (*IFG tri r*; размер – 546 вокселей) активировано 30% ее объема, а в зоне 81 (*POI*; размер – 564 вокселя) активировано 37%.

Материал, представленный в табл. 1, позволяет видеть не только активность каждой зоны мозга человека в ответ на тот или иной стимул, но и определить общее количество (А) зарегистрированных в ходе теста вокселей на каждый стимул, а также число активированных (Б) и дезактивированных (В) вокселей в процессе выполненного теста, в том числе по большим (Г, Д), средним (Е, Ж) и малым (З, И) по величине зонам мозга.

Суммарные ВЗС-оценки, представленные в строке А, могут служить косвенной характеристикой качества выполненного фМРТ-МРТсП исследования [19]. В ходе изучения возможностей ВЗС-оценки эмпирически был уточнен ранее установленный критический объем зарегистрированных в ходе ТСИ вокселей и было установлено, что в случае величины А менее 14 000 вокселей при использовании ультрабыстрых последовательностей сканирования с TR = 1110 мс проведенное фМРТ-МРТсП-исследование не позволяет принять его результаты и выносятся решение, что оно завершилось безрезультатно.

Сверхбыстрое сканирование способствовало также повышению качества ВЗС-оценки активности зон мозга на индивидуальном уровне при ранжировании стимулов по их субъективной значимости. Таким образом, ряд зон мозга действительно устойчиво демонстрируют свою активацию и могут служить маркерами при диагностике сокрытия информации в СИ-парадигме СИ при постимпульной оценке фМРТ-данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты использования метода ВЗС-оценки, во-первых, свидетельствуют о правильности избранного пути создания способа оценки фМРТ-данных на индивидуальном уровне. Во-вторых, эксперименты позволили понять причину отсутствия в настоящее время в зарубежной литературе описания способов оценки фМРТ-данных на индивидуальном уровне и проведения преимущественно фундаментальных исследований: как это ни удивительно, проведение последних оказывается существенно проще, поскольку оценки на групповом уровне позволяют нивелировать ряд методических некорректностей и оставить без обсуждения “острые вопросы”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kovalchuk M.V., Kholodny Y.I. // Adv. Intell. Syst. Comput. 2019. P. 260. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-25719-4>
2. Spence S.A., Farrow T.F., Herford A.E. et al. // Neuroreport. 2001. V. 12. № 13. P. 2849.
3. Langleben D.D., Schroeder L., Maldjian J.A. et al. // NeuroImage. 2002. V. 15. P. 727.
4. Ganis G., Kosslyn S.M., Stose S. et al. // Cereb. Cortex. 2003. V. 13. № 8. P. 830.
5. Farah M.J., Hutchinson J.B., Phelps E.A. et al. // Nature Rev. Neurosci. 2014. V. 15 (2). P. 123.
6. Beecher-Monas E., Garcia-Rill E. // The John Marshall Law Review. 2015. V. 48. № 3. P. 651.
7. Greely H.T., Illes J. // Am. J. L. Med. 2007. V. 33. P. 377.
8. Deceiving the law // Nature Neuroscience. 2008. V. 11. P. 1231.
9. Wagner A. // A judge's guide to neuroscience: a concise introduction. University of California, 2010. P. 13.
10. Gamer M. // Memory detection: theory and application of the concealed information test. Cambridge: C. U. Press, 2011. P. 90.
11. Rosenfeld J.P. Detecting concealed information and deception. Recent Developments. Elsevier Inc. 2018. 440 p.
12. Ковальчук М.В., Холодный Ю.И. // Расследование преступлений: проблемы и пути их решений. 2022. № 4. С. 88.
13. Langleben D.D. et al. // Hum. Brain Mapp. 2005. V. 26. P. 262.
14. Davatzikos C. et al. // NeuroImage. 2005. V. 28. P. 663.

15. *Hakun J.G. et al.* // Neurocase. 2008. V. 14. P. 59.
16. *Nose I., Murai J., Taira M.* // NeuroImage. 2009. V. 44. P. 1380.
17. *Vendemia J.M.C.* // European Polygraph. 2014. V. 8. № 1 (27). P. 5.
18. *Малахов Д.Г., Холодный Ю.И.* Система одновременного контроля и оценки динамики физиологических процессов в условиях проведения магнитно-резонансной томографии человека. Патент на изобретение № 2756566 от 01.10.2021. Заявка № 2021105235 от 02.03.2021.
19. *Ковальчук М.В., Карташов С.И., Орлов В.А., Холодный Ю.И.* // Вестник Военного инновационного технополиса «ЭРА». 2021. Т. 2. № 4. С. 103.
20. *Posner M.I., Raichle M.E.* Images of Mind. Scientific American Books, 1997. 257 p.
21. *Larkman D.J., Hajnal J., Herlihy A. et al.* // J. Magn. Reson. Imaging. 2001. V. 13. P. 313.
22. *Sauseng P., Holz E., Griesmayr B.* // Int. J. Psychophysiol. 2010. V. 77. № 3. P. 207.