

Мухина Т.С.^{1,3}, Шарова Е.В.¹, Болдырева Г.Н.¹, Жаворонкова Л.А.¹, Смирнов А.С.², Куликов М.А.¹,
Александрова Е.В.², Челяпина М.В.¹, Машеров Е.Л.², Пронин И.Н.²

¹ФГБУН «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии» РАН, Москва, Россия;

²ФГБНУ «Научно-исследовательский институт нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия; ³ФГАУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

¹117485, Москва, ул. Бултерова, 5а; ²125047, Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, 16; ³115409, Москва, Каширское шоссе, 31

Особенности нейроанатомии активного движения руки у пациентов с тяжелой черепно-мозговой травмой (анализ данных функциональной магнитно-резонансной томографии)

Цель исследования — анализ особенностей функциональной нейроанатомии движений у пациентов с тяжелой черепно-мозговой травмой (ТЧМТ) при разной выраженности двигательного дефекта в сопоставлении с таковой у здоровых для изучения нейропластичности мозга как основы компенсации.

Пациенты и методы. У 28 пациентов с ТЧМТ были проанализированы изменения церебральной гемодинамики при активном сжимании пальцев правой руки в кулак по данным функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ, 3Т). Группу контроля составили 17 здоровых испытуемых. В фМРТ-ответах определяли процент представленности отдельных структур мозга, участвующих в обеспечении движения, а также объем (Vox) их активации.

Результаты. В группе больных выявлена тенденция к нарастанию диффузности фМРТ-ответа с появлением нетипичных для здоровых испытуемых при двигательной нагрузке зон активации (левая лобная и теменная области, а также затылочные и височные отделы полушарий). Эта тенденция более ярко проявлялась у пациентов с правосторонним гемипарезом.

Заключение. Результаты работы уточняют имеющиеся представления о нейрофизиологических механизмах нарушения и компенсации двигательных функций при черепно-мозговой травме, что важно для разработки и совершенствования методов нейрореабилитации. Получено подтверждение выдвинутой ранее Е.В. Шаровой и соавт. (2014) гипотезы о возможном активном участии экстрапирамидной системы в компенсации посттравматического двигательного дефекта.

Ключевые слова: функциональная магнитно-резонансная томография; активные движения руки; тяжелая черепно-мозговая травма; гемипарез.

Контакты: Елена Васильевна Шарова; esharova@nsi.ru

Для ссылки: Мухина ТС, Шарова ЕВ, Болдырева ГН и др. Особенности нейроанатомии активного движения руки у пациентов с тяжелой черепно-мозговой травмой (анализ данных функциональной магнитно-резонансной томографии). Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика. 2017;9(1):27–33.

The neuroanatomy of active hand movement in patients with severe traumatic brain injury:

Analysis of functional magnetic resonance imaging data

Mukhina T.S.^{1,3}, Sharova E.V.¹, Boldyreva G.N.¹, Zhavoronkova L.A.¹, Smirnov A.S.², Kulikov M.A.¹, Aleksandrova E.V.², Chelyapina M.V.¹, Masherov E.L.², Pronin I.N.²

¹Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; ²Acad. N.N. Burdenko Research Institute of Neurosurgery, Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia; ³National Research Nuclear University,

Moscow Engineering and Physical Institute, Moscow, Russia

¹5a, Butlerov St., Moscow 117485; ²16, Fourth Tverskaya-Yamskaya St., Moscow 125047; ³31, Kashirskoe Shosse, Moscow 115409

Objective: to analyze the characteristics of the functional neuroanatomy of movements in severe traumatic brain injury (STBI) patients with varying severity of motor defect versus that in healthy individuals for the study of brain neuroplasticity as a basis of compensation.

Patients and methods. Functional magnetic resonance imaging (fMRI, 3T) was used to analyze cerebral hemodynamic changes in 28 patients with STBI during an active right-hand finger tapping task. A control group consisted of 17 healthy individuals. The percentage of representation of individual brain structures involved in movements and volume activation (Vox) was determined in fMRI responses.

Results. The patient group showed a tendency for an increased fMRI response diffusion with the emergence of activation zones (the left frontal and parietal regions, as well as the occipital and temporal regions of the cerebral hemispheres) that are atypical for healthy individuals during motor exercises. This trend is more evident in patients with right-sided hemiparesis.

Conclusion. The results of the study clarify the existing ideas about the neurophysiological mechanisms of motor impairment and compensation in traumatic brain injury, which is important for the development and improvement of neurorehabilitation techniques. There is evidence for the hypothesis that the extrapyramidal system may be actively involved in the compensation for post-traumatic musculoskeletal defect, which was earlier proposed by E.V. Sharova et al. (2014).

Keywords: functional magnetic resonance imaging; active hand movements; severe traumatic brain injury; hemiparesis.

Contact: Elena Vasilyevna Sharova; esharova@nsi.ru

For reference: Mukhina TS, Sharova EV, Boldyreva GN, et al. The neuroanatomy of active hand movement in patients with severe traumatic brain injury: Analysis of functional magnetic resonance imaging data. *Nevrologiya, neiropsikhiatriya, psikhosomatika = Neurology, neuropsychiatry, psychosomatics.* 2017;9(1):27–33.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14412/2074-2711-2017-1-27-33>

Изучение нейрофизиологических механизмов восстановления нарушенных функций при черепно-мозговой травме (ЧМТ) — актуальная медико-биологическая проблема. Согласно данным статистики, в России ЧМТ ежегодно получают около 600 тыс. человек, причем у 60 тыс. это тяжелая ЧМТ (ТЧМТ) [1]. Последствиями ТЧМТ могут быть разнообразные функциональные нарушения, в том числе двигательные, например, в форме посттравматического гемипареза. Хотя в терапии этой патологии достигнуты значительные успехи, стандарты ее реабилитации при ТЧМТ до настоящего времени отсутствуют.

Цель настоящего исследования — анализ особенностей функциональной нейроанатомии движений у пациентов с ТЧМТ при разной выраженности двигательного дефекта в сопоставлении с таковыми у здоровых испытуемых в контексте изучения нейропластичности мозга как основы компенсации.

Пациенты и методы. Основным методом исследования была функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ). В качестве тестового движения использовали активное сжатие пальцев в кулак. Возможное применение такого подхода обосновано серией наших предшествующих исследований у здоровых добровольцев [2, 3] и больных с опухолевым поражением мозга [4], которые показали правомерность выбора этой двигательной парадигмы для картирования двигательной системы.

Исследования выполнены у 17 здоровых праворуких испытуемых в возрасте от 21 года до 39 лет и 28 пациентов с ТЧМТ в возрасте от 18 до 48 лет. Больных обследовали через 3–6 мес после ТЧМТ. Проводили общую клинико-неврологическую оценку состояния и данных структурной магнитно-резонансной томографии (МРТ). Все пациенты находились в сознании и были способны выполнить двигательную инструкцию. Среди них были пациенты с отсутствием и наличием посттравматического двигательного дефекта в форме гемипареза. Степень этого дефекта определяли по шкале оценки мышечной силы [5, 6], согласно которой грубость гемипареза возрастает по мере уменьшения величины оценочных баллов. По этому показателю пациенты были разделены на две группы: 1-я группа — 20 больных без посттравматического двигательного дефекта (5 баллов); 2-я группа — 7 пациентов с легким гемипарезом (4 балла) и 1 пациент с умеренным гемипарезом (3 балла).

МРТ-изображения получали на магнитно-резонансном томографе General Electric Signa HDxt (США) с напряженностью магнитного поля 3,0 Тл и скоростью нарастания поля 135 мТл/(м/с). Измерения осуществляли согласно блоковой парадигме, состоящей из 12-секундного подготовительного периода (для формирования устойчивого МР-сигнала) и 5-минутной функциональной серии — пятикратно чередования периодов покоя и выполнения пробы, длительность каждого периода — 30 с. Интервалы «активности» (т. е. выполнения тестового задания) и «покоя» строго

синхронизировали по времени. Время сканирования (без перерыва) составляло 5 мин 12 с. Двигательные пробы выполняли при закрытых глазах испытуемого.

Данные фМРТ обрабатывали с помощью программы SPM8 в среде MATLAB. Коррекцию артефактов движения в виде пятен и дополнительных изображений вдоль направления фазового кодирования [7] осуществляли по стандарту Generalized Linear Model (GLM). В каждом исследовании оценивали увеличение локального кровенаполнения мозговой ткани (+BOLD-эффект) при нагрузке по сравнению с фоном в коре и подкорковых образованиях ($p < 0,001$). Для здоровых испытуемых дополнительно проводили статистический анализ топографии ответов по группе наблюдений с помощью программы Монреальского неврологического института. Порог значимости групповых различий составлял $p < 0,001$ без Family-Wise Error (FWE). Ответы в разных мозговых структурах при движениях сравнивали с помощью парного t-теста (paired t-test) в программе SPM8 MATLAB.

Для верификации активированных зон и определения их пространственного нахождения (MNI-координаты), а также объема активации в вокселях (Vox) использовали приложение Automated Anatomical Labeling (AAL) на базе MATLAB. Структуры в полученных таблицах были объединены в более крупные функционально значимые области. Так, в моторную зону вошли *gyrus Precentralis*, *Paracentral lobula*, в лобную — *Frontal Sup.*, *Supra Marginalis*, *Frontal Mid.*, *Fusiform* и т. д.

Проводили анализ индивидуальных и групповых фМРТ-ответов с использованием различных статистических критериев. Для анализа различий процента встречаемости активированных областей между выборками «норма» и «отсутствие гемипареза» (1-я группа), «норма» и «легкий гемипарез» (2-я группа), а также между выборками пациентов с отсутствием гемипареза (1-я группа) и легким гемипарезом (2-я группа) проводили анализ на основе критерия χ^2 Пирсона. Вычисляли значения p при уровне значимости нулевой гипотезы $\alpha = 0,05$, заключающейся в сравнении распределений эмпирических и теоретических частот и определении, насколько эти распределения сходны. Если разница между ними существенна, то различия значимы и имеется связь между поведением независимой переменной и распределением эмпирических частот. Выбор данного метода обоснован некорректностью результатов классического метода однофакторного анализа, основанного на F-критерии Фишера, при встречаемости < 15 и $> 85\%$.

При анализе объемов активации (Vox) областей мозга в фМРТ-ответах, ввиду ненормальности распределений этого показателя для отдельных структур в группах наблюдений, при статистическом анализе был использован непараметрический ранговый критерий Краскела–Уоллиса. Он включает оценку разности между медианами двух независимых выборок, что позволяет перейти от численных значений к рангам и избежать получения некорректных результатов.

Результаты. Групповой анализ гемодинамических перестроек мозга при сжимании пальцев правой руки в кулак, проведенный у здоровых (рис. 1), позволил выявить три характерные зоны активации мозга: основной корковый компонент, расположенный в сенсомоторной области контралатерального (по отношению к работающей руке) полушария, ответ в дополнительной моторной коре (медиальные отделы верхней лобной извилины) и ответ в ипсилатеральном полушарии мозжечка. Участие в реакции других структур мозга, включая подкорковые образования, было выражено в значительно меньшей степени и резко варьировало.

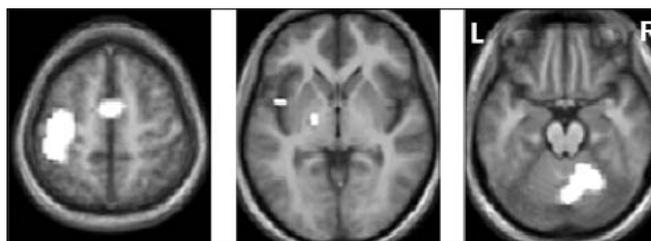


Рис. 1. Усредненный по группе здоровых испытуемых фМРТ-ответ при движении правой рукой ($n=17$, $t=3,69$, $p<0,001$)

Гемодинамические перестройки мозга при двигательной нагрузке у пациентов с ТЧМТ характеризовались высокой межиндивидуальной вариабельностью. На рис. 2 представлены разные варианты двигательных фМРТ-ответов у больных с травматическим поражением мозга. При отсутствии гемипареза (см. рис. 2, а) в первом случае (пациент З.) наличие активации в сенсомоторной зоне сочетается с ослаблением (по сравнению с нормой) ответа в мозжечке и отсутствием его в дополнительной моторной коре. Во втором случае (пациент А.) при сохранности ответа в сенсомоторной области, дополнительной моторной зоне и ипсилатеральном полушарии мозжечка выявляется, хотя и слабый, ответ в височной области контралатерального полушария, а также в черве мозжечка.

При наличии гемипареза (см. рис. 2, б) фМРТ-ответ мог значительно отличаться от нормы (пациент О.), характеризуюсь лишь отсутствием активации в дополнительной моторной зоне. В другом случае (пациент И.) обращает на себя внимание резко выраженный диффузный характер ответа с включением нетипичных для данного вида двигательной нагрузки у здоровых испытуемых отделов мозга. Помимо контралатеральной сенсомоторной зоны, активируются области ипсилатерального полушария (моторная, теменная и височная); реакция мозжечка также носит билатеральный характер; активируются подкорковые структуры обоих полушарий.

В табл. 1 приведены результаты сравнительной оценки представленности диффузных ответов у здоровых испытуемых и пациентов с ЧМТ по данным визуального анализа фМРТ. В норме наличие диффузных ответов встречалось в 35% случаев, у пациентов с ТЧМТ при отсутствии гемипареза (1-я группа) – примерно в 45%, при легком гемипарезе (2-я группа) – в 57%. Диффузный фМРТ-ответ был выявлен также у единственного пациента с умеренным гемипарезом, который

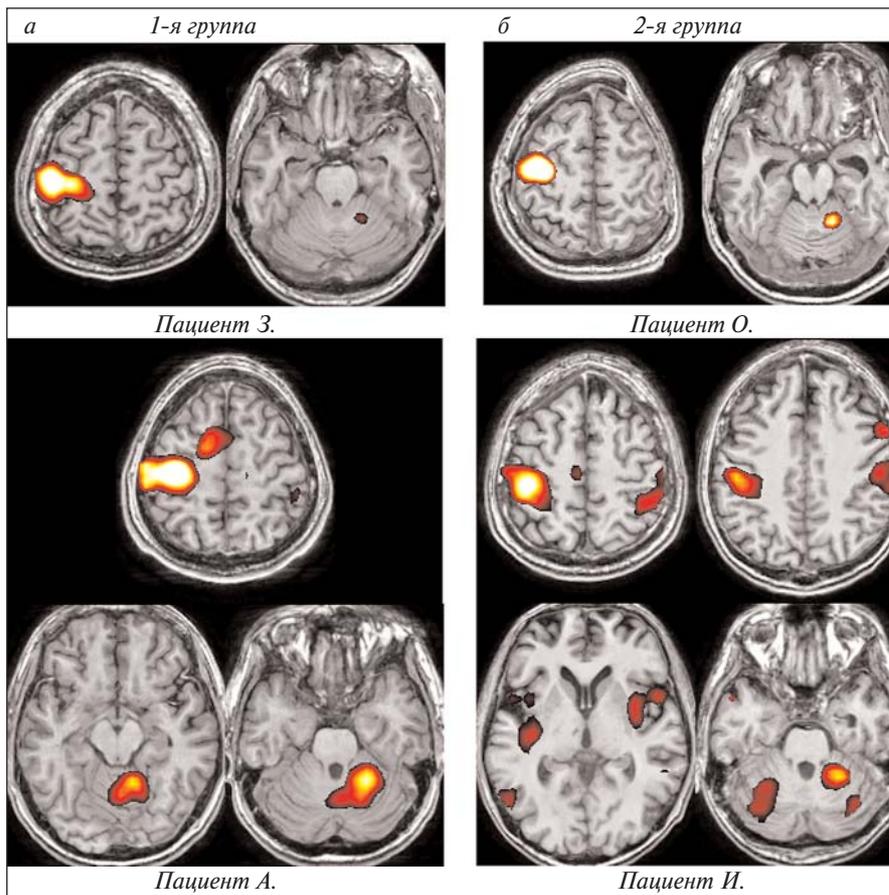


Рис. 2. Примеры фМРТ-двигательных ответов у больных с отсутствием (а) и наличием (б) гемипареза

смог выполнить эту пробу. Полученные данные свидетельствуют о наличии тенденции к нарастанию диффузности двигательного фМРТ-ответа при снижении мышечной силы после ТЧМТ.

Был проведен сравнительный статистический анализ процентной представленности структур, активированных

Таблица 1.

Сравнительная оценка представленности диффузных ответов в норме и при ЧМТ при разной выраженности гемипареза, n (%)

Группа обследованных	Локальный ответ	Диффузный ответ
Здоровые	11 (65)	6 (35)
1-я (отсутствие гемипареза)	11 (55)	9 (45)
2-я (легкий гемипарез)	3 (43)	4 (57)

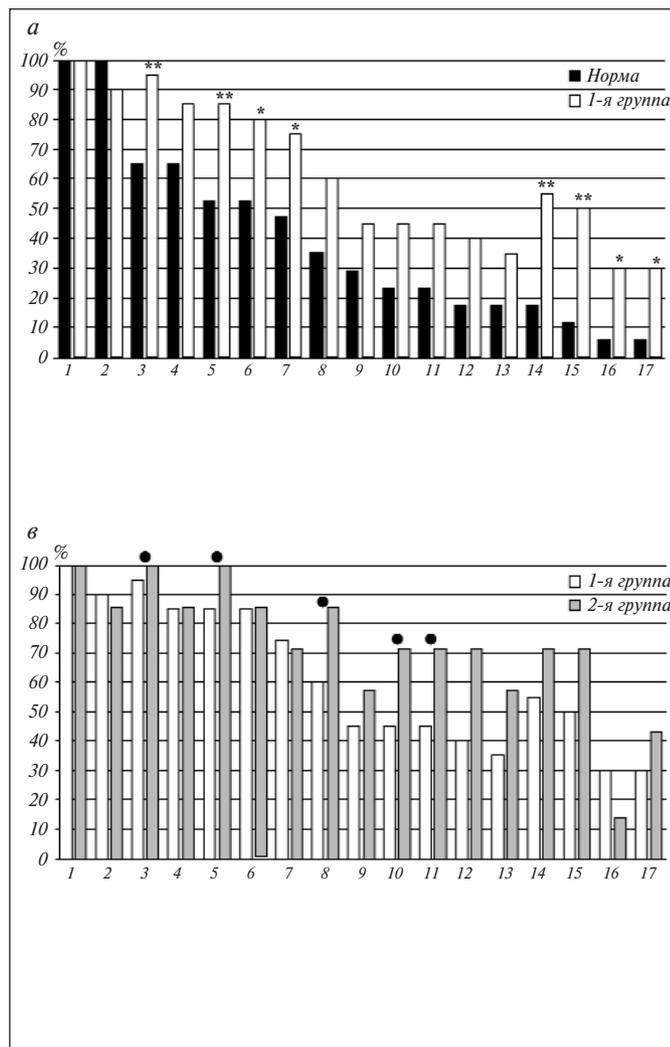


Рис. 3. Сравнительная оценка представленности (в %) фМРТ-активации отдельных мозговых структур при движении правой рукой у здоровых испытуемых и пациентов с ТЧМТ при разной выраженности гемипареза. а – в норме и при отсутствии гемипареза (1-я группа); б – в норме и при легком гемипарезе (2-я группа); в – без гемипареза (1-я группа) и при гемипарезе (2-я группа). На рис. а и б – структуры, для которых нулевая гипотеза не выполнялась, помечены звездочками: * – $0,05 < p < 0,1$ (наличие тенденции); ** – вероятность различий в интервале $0,001 < p < 0,05$; на рис. в – черные кружки – $0,15 < p < 0,28$. На рис. а–в представлены области головного мозга: 1 – моторная контралатеральная; 2 – мозжечок ипсилатеральный; 3 – теменная контралатеральная; 4 – червь мозжечка; 5 – лобная контралатеральная; 6 – дополнительная моторная; 7 – лобная ипсилатеральная; 8 – лимбическая контралатеральная; 9 – моторная ипсилатеральная; 10 – височная контралатеральная; 11 – теменная ипсилатеральная; 12 – затылочная кора; 13 – височная ипсилатеральная; 14 – речевая ипсилатеральная; 15 – мозжечок контралатеральный; 16 – таламус контралатеральный; 17 – подкорковые ядра контралатеральные

в двигательном фМРТ-ответе, у здоровых и пациентов с ЧМТ: между 1-й группой и нормой, 2-й группой и нормой, а также 1-й и 2-й группами (рис. 3). Для определения достоверности изменений и зависимости их от наличия гемипареза выполнен анализ с использованием критерия χ^2 Пирсона для дисперсий при уровне значимости нулевой гипотезы $\alpha=0,05$.

Из рис. 3, а следует, что при отсутствии гемипареза у пациентов с ТЧМТ в двигательном ответе нарастает активация не только структур, причастных к обеспечению движения в норме, но и ряда «недвигательных» областей мозга, например, лобной, затылочной коры и др. Нарастание активности дополнительной моторной коры и лобных отделов ипсилатерального (левого) полушария, а также двигательных подкорковых ядер и таламуса, входящих в систему организации движения (глубинные структуры левого полушария), менее достоверно. Наиболее значимым является усиление активации таких областей, как теменная и лобная доли контралатерального движению полушария, а также контралатеральное полушарие мозжечка. Нетипично и неожиданно достоверное усиление активации височных отделов правой гемисферы, симметричных речевой зоне.

У пациентов с легким гемипарезом (см. рис. 3, б) активное движение сопряжено с еще большим диффузным усилением возбудимости анализируемых мозговых образований по сравнению с нормой. Причем количество структур

с достоверными изменениями у них больше, чем в группе без гемипареза. Эти образования относятся не только к функциональной сети обеспечения движения в рамках пирамидной системы (контралатеральные движению лобная и теменная доли, подкорковые ядра и ипсилатеральный мозжечок). Значимо усилена активность затылочной и височной коры обоих полушарий, а также лимбических образований контралатерального движению левого полушария.

Сравнительный анализ представленности активированных структур в двигательном фМРТ-ответе у пациентов без гемипареза и с легким посттравматическим гемипарезом (рис. 3, в) выявил наличие различий в виде статистической тенденции ($0,15 < p < 0,28$) для таких областей, как контралатеральные ведущей руке лобная, височная, теменная и лимбическая зоны, а также ипсилатеральная теменная доля. В группе с легким гемипарезом представленность этих структур в двигательном фМРТ-ответе была выше, чем в группе без такого дефекта.

Полученные данные также свидетельствуют о том, что выявленная у пациентов с ТЧМТ тенденция к нарастанию диффузности двигательного фМРТ-ответа обеспечивается включением в реакцию дополнительных областей мозга, в том числе и нехарактерных для нормы.

В группах наблюдений мы сопоставили также степень активированности структур, участвующих в обеспечении

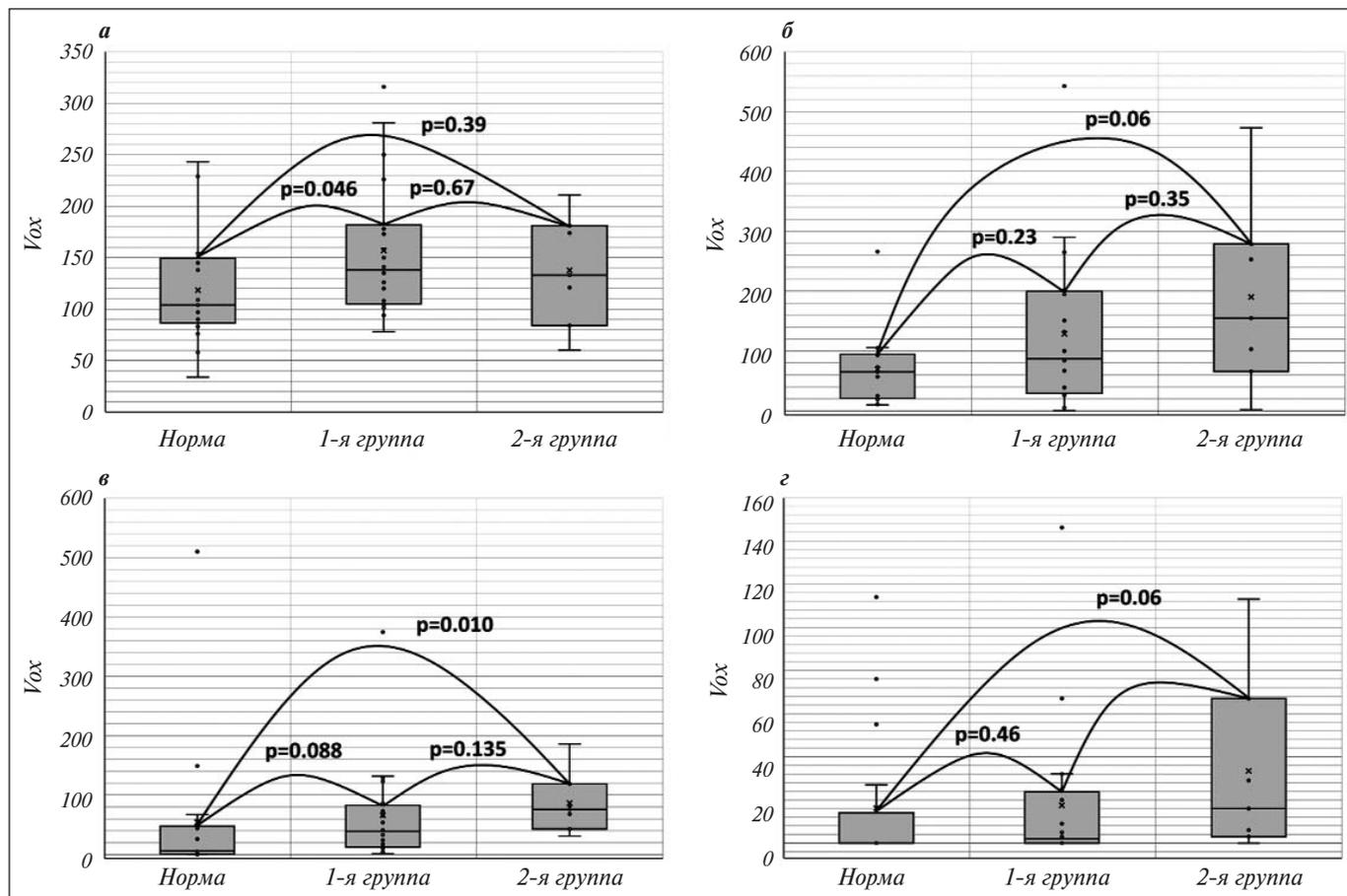


Рис. 4. Сопоставление объемов активации ряда структур головного мозга в двигательном фМРТ-ответе у здоровых лиц и пациентов с разной выраженностью посттравматического гемипареза.

а – контралатеральная моторная область; б – ипсилатеральный мозжечок; в – контралатеральная лобная область; г – ипсилатеральная теменная кора. Темная горизонтальная линия в середине «ящика» – медиана исследуемой выборки. Нижняя граница «ящика» соответствует 25-му перцентилю, верхняя – 75-му. В пределах «ящика» находятся показатели 50% наблюдений.

Точки внутри и в пределах «ящиков» – индивидуальные значения исследуемых показателей. Линии соединяют группы сравнения

двигательного фМРТ-ответа, сравнивая объемы их активации (Voх) в норме и при ТЧМТ. Для ряда активированных структур, потенциально значимых для компенсации двигательного дефекта, в программе Excel строились диаграммы «Ящики с усами» [8] в качестве наиболее наглядного и простого метода сравнения медиан и средних значений выборок (рис. 4). Анализ этих диаграмм выявил ненормальный характер распределения объемов активации исследованных структур как в норме, так и при ТЧМТ, что обусловило выбор статистического анализа исследуемого показателя с использованием непараметрического критерия Краскела–Уоллиса.

Анализ активации основных структурных компонентов двигательного фМРТ-ответа показал следующее. Хотя процент представленности в нем контралатеральной моторной коры в группах наблюдений оставался неизменным (см. рис. 3), рис. 4, а демонстрирует слабое куполообразное нарастание среднего и медианы объема активации этой структуры у пациентов с ТЧМТ по сравнению с нормой: достоверное в группе без гемипареза, недостоверное (по сравнению с обеими группами) у пациентов с легким гемипарезом.

Для ипсилатерального (относительно работающей руки) мозжечка (рис. 4, б) отмечена обратная зависимость: хотя представленность его в активном двигательном фМРТ-ответе у пациентов обеих групп с ТЧМТ незначимо снижается по сравнению с нормой (см. рис. 3), средний объем активации нарастает, достоверно при легком гемипарезе.

Наряду с этим были выявлены значимые ($0,001 < p < 0,05$) посттравматические изменения объемов активации (преимущественное нарастание) ряда структур головного мозга, не относящихся к числу основных компонентов нормального двигательного фМРТ-ответа. Это, в частности, контралатеральная (рис. 4, в) и ипсилатеральная лобная кора, ипсилатеральная (рис. 4, г) и контралатеральная теменная кора, а также контралатеральное движению полушарие мозжечка и его червь. Для объема активации контралатеральной лобной области значимость различий между группами наблюдений была наибольшей.

Обсуждение. Результаты исследования показали тенденцию к усилению диффузности активного двигательного фМРТ-ответа у пациентов с ТЧМТ по сравнению со здоровыми. Ранее нарастание диффузности фМРТ-ответов было

Таблица 2. Соотношение локальных и диффузных фМРТ-ответов при разной латерализации поражения в группе больных с ЧМТ без гемипареза, n (%)

фМРТ-ответ	Повреждение справа	Повреждение слева
Локальный	8 (80)	2 (20)
Диффузный	4 (44)	5 (56)

отмечено при выполнении разных заданий у пациентов с ЧМТ [9], опухолью головного мозга [10] и другими формами церебрального поражения [11, 12] по мере усиления выраженности клинических признаков церебральной дисфункции. В нашем исследовании эта тенденция проявляется более наглядно с возникновением у больных двигательного дефекта в форме гемипареза – в виде увеличения процента диффузных ответов с включением нехарактерных для нормы «недвигательных» областей мозга, а также значимого увеличения объемов их активации. Одним из объяснений подобного рода изменений может быть неспецифическое диффузное повышение возбудимости мозга вследствие травмы. Другое объяснение, более соответствующее нашим представлениям, состоит в том, что изменения нейроанатомии активного движения руки у пациентов с ТЧМТ отражают проявление нейропластичности мозга как основы возможной компенсации двигательного дефекта.

В пользу второго предположения свидетельствуют данные проведенного нами анализа структурных особенностей повреждения головного мозга (данные МРТ) в группах пациентов с ТЧМТ, которые, согласно принятым представлениям [13], могут определять механизмы компенсаторного процесса и его конечный результат. Выявлено, что в наблюдениях без правостороннего гемипареза (1-я группа) в структуре травмы преобладают довольно локальные повреждения больших полушарий в лобных (преимущественно справа) и височных (больше слева) корковых областях. Во 2-й группе пациентов с легким правосторонним гемипарезом более диффузное повреждение больших полушарий сочетается с повышением в структуре церебрального дефекта доли подкорковых образований, моста и ножек мозга, а также с увеличением процента наблюдений с диффузным аксональным повреждением. Согласно данным недавних исследований, в последнем случае зачастую имеет место повреждение основного тракта, обеспечивающего движение в норме (кортикоспинальный тракт) [14, 15]. Следует добавить, что более диффузный фМРТ-ответ в обеих группах характерен для пациентов с преимущест-

венным повреждением контралатерального выполняемому движению левого полушария (табл. 2).

Таким образом, диффузный двигательный фМРТ-ответ у пациентов с ТЧМТ сопряжен с большей сложностью выполнения движения правой рукой в связи с повреждением основных регионов мозга, обеспечивающих его в норме. Сопоставление функциональной нейроанатомии движения в группах наблюдений с топографической анатомией двигательного анализатора [16] позволяет строить предположения о путях компенсации двигательного дефекта. Согласно полученным результатам, при нарастании выраженности посттравматических двигательных нарушений в фМРТ-ответ включаются такие «недвигательные» корковые области, как лобная, височная, теменная и затылочная. Они относятся к числу корковых проекций переднемостового, теменно-височно-мостового и затылочно-мезэнцефального экстрапирамидных двигательных путей. Эти данные свидетельствуют в пользу сформулированной нами ранее гипотезы о возможной активной роли трактов экстрапирамидной системы в качестве «функциональных дублеров» при посттравматических двигательных нарушениях [17].

В исследованиях больных инсультом с нарушениями двигательной сферы показано перераспределение активации между вторичными ассоциативными областями и первичной сенсомоторной зоной пораженного полушария, а также изменение их функциональных взаимодействий в процессе нейрореабилитации [18], но не объяснено, за счет каких нисходящих путей возможно при этом обеспечение движения. Наша трактовка частично отвечает на этот вопрос и обосновывает также разновариантные, персонифицированные подходы к реабилитации двигательного дефекта: интерфейс «мозг – компьютер» [19], мультимодальная афферентация [20], транскраниальная магнитная стимуляция [21].

Заключение. Проведенный в работе сравнительный качественный и количественный анализ фМРТ-ответов при активном сжатии пальцев правой руки в кулак у здоровых и пациентов с ТЧМТ позволил выявить изменения функциональной нейроанатомии этого движения при разной выраженности двигательного дефекта в форме гемипареза. Показанная тенденция к усилению диффузности активного двигательного фМРТ-ответа у пациентов с ТЧМТ по сравнению со здоровыми – с включением нехарактерных для нормы «недвигательных» областей мозга – отражает, по нашему мнению, вариативный характер механизмов компенсации посттравматических двигательных нарушений.

Работа поддержана Грантами РГНФ (№ 15-36-01038) и РФФИ (16-29-08304 офи_м).

ЛИТЕРАТУРА

1. Потапов АА, Лихтерман ЛБ, Кравчук АД, Рошаль ЛМ. Черепно-мозговая травма: проблемы и перспективы. Вопросы нейрохирургии им. Н.Н.Бурденко. 2009;(2):3-8. [Potapov AA, Likhberman LB, Kravchuk AD, Roshal' LM. Traumatic brain injury: problems and prospects. *Voprosy neirokhirurgii im. N.N.Burdenko*. 2009;(2):3-8. (In Russ.)].
2. Болдырева ГН, Шарова ЕВ, Жаворонкова ЛА и др. фМРТ и ЭЭГ реакции мозга

здорового человека при активных и пассивных движениях ведущей рукой. Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. 2014;64(5):488-99. [Boldyreva GN, Sharova EV, Zhavoronkova L, et al. fMRI and EEG response of the brain of a healthy person with active and passive movements of the leading hand. *Zhurnal vysshei nervnoi deyatel'nosti im. I.P. Pavlova*. 2014;64(5):488-99. (In Russ.)].
3. Болдырева ГН, Шарова ЕВ, Жаворонкова

ЛА и др. Сопоставление фМРТ-реакций мозга здоровых людей при активных, пассивных и воображаемых движениях рукой. Медицинская визуализация. 2015;(5):100-12. [Boldyreva GN, Sharova EV, Zhavoronkova LA, et al. The fMRI mapping of brain responses of healthy people with active, passive and imagined movements of the hand. *Meditsinskaya vizualizatsiya*. 2015;(5):100-12. (In Russ.)].

4. Болдырева ГН, Жаворонкова ЛА, Шарова ЕВ и др. фМРТ – ЭЭГ оценка реакций на двигательные нагрузки при опухолевом поражении мозга. Физиология человека. 2010;36(5):66-75. [Boldyreva GN, Zhavoronkova LA, Sharova EV i dr. fMRI – EEG estimation of reactions to locomotion in tumor lesions of the brain. *Fiziologiya cheloveka*. 2010;36(5):66-75. (In Russ.)].
5. Вейс М, Зембатый АМ, редакторы. Физиотерапия. Москва: Медицина; 1986. 496 с. [Veis M, Zembatyi AM, editors. *Fizioterapiya* [Physiotherapy]. Moscow: Meditsina; 1986. 496 p.]
6. McPeak LA. Physiatric history and examination. In: Braddom R, editor. Physical medicine and rehabilitation. W.B. Saunders Company; 1996. P. 3-42.
7. Марусина МЯ, Казначеева АО. Современные виды томографии. Учебное пособие. Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО; 2006. 152 с. [Marusina MYa, Kaznacheeva AO. *Sovremennye vidy tomografii. Uchebnoe posobie* [Modern types of imaging. Tutorial]. Saint-Petersburg: SPbGU ITMO; 2006. 152 p.]
8. Монова АА. Статистика. Краткий курс лекций для студентов заочного отделения Смольного института. Санкт-Петербург; 2011. 156 с. [Monakhova AA. *Statistika. Kratkii kurs lektcii dlya studentov zaonchnogo otdeleniya Smol'nogo instituta* [A short course of lectures for students of the correspondence Department of the Smolny Institute]. Saint-Petersburg; 2011. 156 p.]
9. Zang K, Johnson B, Ray W, et al. Are functional deficits in concussed individuals consistent with white matter structural alterations: combined FMRI and DTI study. *Exp Brain Res*. 2010 Jul;204(1):57-70. doi: 10.1007/s00221-010-2294-3. Epub 2010 May 23.
10. Болдырева ГН, Жаворонкова ЛА, Шарова ЕВ и др. ЭЭГ – фМРТ анализ функциональной специализации мозга человека в норме и при церебральной патологии. Медицинская визуализация. 2012;(1):16-26. [Boldyreva GN, Zhavoronkova LA, Sharova EV, et al. EEG – fMRI analysis of the functional specialization of the human brain in normal and cerebral pathology. *Meditsinskaya vizualizatsiya*. 2012;(1):16-26. (In Russ.)].
11. Купцова СВ, Петрушевский АГ, Федина ОН, Жаворонкова ЛА. фМРТ-исследование особенностей функциональной активности мозга при произвольном переключении внимания у пациентов с речевыми расстройствами. Медицинская визуализация. 2016;(4):10-21. [Kuptsova SV, Petrushevskii AG, Fedina ON, Zhavoronkova LA. An FMRI study of the peculiarities of the functional activity of the brain under arbitrary switching attention in patients with speech disorders. *Meditsinskaya vizualizatsiya*. 2016;(4):10-21. (In Russ.)].
12. Белопасова АВ, Кадыков АС, Коновалов РН, Кремнева ЕИ. Организация нейрональной речевой сети у здоровых и ее реорганизация у пациентов с постинсультной афазией. Анналы клинической и экспериментальной неврологии. 2012;6(4):52-6. [Belopasova AV, Kadykov AS, Konovalov RN, Kremneva EI. The organization of the neuronal speech network in healthy and its reorganization in patients with post-stroke aphasia. *Annaly klinicheskoi i eksperimental'noi neurologii*. 2012; 6(4):52-6. (In Russ.)].
13. Подачин ВП, Сидоров БМ. Компенсаторные процессы при повреждении лимбической системы. Москва: Наука; 1988. 157 с. [Podachin VP, Sidorov BM. *Kompensatornye protsessy pri povrezhdenii limbicheskoi sistemy* [Compensatory processes in damage of the limbic system]. Moscow: Nauka; 1988. 157 p.]
14. Захарова НЕ, Потапов АА, Корниенко ВН и др. Оценка состояния проводящих путей головного мозга при диффузных аксональных повреждениях с помощью диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии. Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко. 2010;(2):3-9. [Zakharova NE, Potapov AA, Kornienko VN, et al. Assessment of pathways in the brain diffuse axonal injury using diffusion tensor magnetic resonance imaging. *Voprosy neurokhirurgii im. N.N. Burdenko*. 2010;(2):3-9. (In Russ.)].
15. Zakharova N, Kornienko V, Potapov A, Pronin I. Neuroimaging of traumatic brain injury. London: Springer; 2014. 159 p.
16. Дуус П. Топический диагноз в неврологии. Анатомия. Физиология. Клиника. Москва: ВАЗАР-ФЕРРО; 1997. 400 с. [Duus P. *Topicheskii diagnoz v neurologii. AnATOMiya. Fiziologiya. Klinika* [Topical diagnosis in neurology. Anatomy. Physiology. Clinic]. Moscow: VAZAR-FERRO; 1997. 400 p.]
17. Шарова ЕВ, Болдырева ГН, Жаворонкова ЛА и др. Возможности фМРТ в исследовании нейропластичности обеспечения движений в норме и при черепно-мозговой травме. В кн.: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Фундаментальные проблемы нейронаук: функциональная асимметрия, нейропластичность и нейродегенерация». Москва: Научный центр неврологии РАМН; 2014. С. 900-3. [Sharova EV, Boldyreva GN, Zhavoronkova LA, et al. The possibility of fMRI in the study of neuroplasticity ensure movements in normal and traumatic brain injury. In: *Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Fundamental'nye problemy neuronauk: funktsional'naya asimmetriya, neuroplastichnost' i neurodegeneratsiya»* [Materials of all-Russian scientific conference with international participation «Fundamental problems of neuroscience: functional asymmetry, neuroplasticity and neurodegeneration»]. Moscow: Nauchnyi tsentr neurologii RAMN; 2014. P. 900-3.]
18. Саенко ИВ, Морозова СН, Змейкина ЭА и др. Исследование процессов меж-и внутриполушарных взаимодействий (функциональной коннективности) моторных зон головного мозга при использовании мультимодального экзоскелетного комплекса в нейрореабилитации больных, перенесших инсульт. В кн.: Научные труды V Съезда Физиологов СНГ. Сочи-Дагомыс; 2016. С. 31. [Saenko IV, Morozova SN, Zmeikina EA, et al. Study of the processes of inter- and intrahemispheric interactions (functional connectivity) motor areas of the brain when using multimodal exoskeleton complex in neurorehabilitation of patients with stroke. In: *Nauchnye trudy V S'ezda Fiziologov SNG* [Scientific proceedings of the V Congress of Physiologists of the CIS]. Sochi-Dagomys; 2016. P. 31.]
19. Frolov A, Husek D, Bobrov P, et al. Sources of EEG activity the most relevant to performance of brain-computer interface based on motor imagery. *Neural Network World*. 2012;22(1):21-37.
20. Zhavoronkova L, Kuptsova S, Kushnir E, et al. EEG markers of poor dual tasks performance in traumatic brain injury patients. Congress on Neurorehabilitation and Neural Repair. 21-22 May 2015. Maastricht. P. 141-2.
21. Су ВИ, Ченг СГ, Лиао КК и др. Воздействие ритмической транскраниальной магнитной стимуляции на двигательную функцию у пациентов с инсультом: метаанализ. Российское издание Stroke. 2012;(3):45-55. [Su VI, Cheng SG, Liao KK, et al. Impact of rhythmic transcranial magnetic stimulation on motor function in stroke patients: a meta-analysis. *Rossiiskoe izdanie Stroke*. 2012;(3):45-55. (In Russ.)].

Поступила 14.12.2016

Декларация о финансовых и других взаимоотношениях

Исследование не имело спонсорской поддержки. Авторы несут полную ответственность за предоставление окончательной версии рукописи в печать. Все авторы принимали участие в разработке концепции статьи и написании рукописи. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.