

УДК 612.821

фМРТ-РЕАКЦИИ МОЗГА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ДВИГАТЕЛЬНЫХ НАГРУЗОК У ПАЦИЕНТОВ С ЧЕРЕПНО-МОЗГОВОЙ ТРАВМОЙ

© 2018 г. Л. А. Жаворонкова^{1, *}, С. И. Морареску², Г. Н. Болдырева¹, Е. В. Шарова¹, С. В. Купцова^{1, 4}, А. С. Смирнов³, Е. Л. Машеров³, И. Н. Пронин³

¹ФГБУ Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ФГБУ Институт нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко, Москва, Россия

⁴ГБУЗ Центр патологии речи и нейрореабилитации, Москва, Россия

*E-mail: lzhavoronkova@hotmail.com

Поступила в редакцию 24.10.2017 г.

Проанализированы гемодинамические реакции мозга на двигательные пробы для правой и левой руки у 22 здоровых испытуемых (25.1 ± 3.9 лет) и 9 пациентов с черепно-мозговой травмой (ЧМТ) (27.9 ± 7.3 лет) с ведущей правой рукой, отсутствием гемипарезов и локальных очагов поражения в сенсомоторной коре. Установлено, что у здоровых испытуемых при выполнении движений левой рукой выявлена большая, по сравнению с правосторонней нагрузкой, межиндивидуальная вариативность топографии основных зон активации в функциональных магнитно-резонансных томографических (фМРТ)-ответах. У пациентов с ЧМТ в фМРТ-ответах наблюдается нарастание диффузного компонента с вовлечением большего числа структур мозга, включающих неспецифические для двигательного анализатора области коры и подкорковые образования, что наиболее отчетливо выражено в доминантном, левом полушарии (при выполнении движения правой, ведущей рукой).

Ключевые слова: фМРТ, черепно-мозговая травма, двигательные нагрузки.

DOI: 10.1134/S0131164618050168

Важным аспектом изучения механизмов работы мозга и, в частности, его пластичности является анализ реактивных перестроек при различных видах патологии. Черепно-мозговая травма (ЧМТ) является одной из распространенных форм церебральной патологии, наиболее часто встречающаяся в молодом трудоспособном возрасте и в результате дорожно-транспортных происшествий, спортивных травм и пр. По статистике только в России ЧМТ получает около 600 тыс. человек в год, из которых 60 тыс. считается наиболее тяжелой и приводит к социальной дезадаптации молодых людей [1].

Посттравматические нарушения, как правило, носят многокомпонентный характер с множественным повреждением корковых и подкорковых структур, а также проводящих путей [2]. Важной особенностью ЧМТ является часто развивающееся диффузное аксональное повреждение [3], которое приводит к замедлению или полному прекращению передачи сигналов по проводящим путям [4, 5]. По современным представлениям именно дезинтеграция является важным патогенетическим фактором ЧМТ [5]. Поэтому последствия ЧМТ часто связаны с нарушениями в различных сферах деятельности — когнитивной,

эмоциональной и двигательной, например, в форме посттравматического гемипареза. Следует отметить, что и при отсутствии отчетливых неврологических нарушений и гемипарезов в течение достаточно длительного периода после травмы у пациентов могут проявляться различные трудности, в частности, в их прежней профессиональной деятельности [6]. Однако нейрофизиологические механизмы этих нарушений изучены недостаточно и требуют специальных исследований.

В последние годы было проведено много исследований, посвященных молекулярным и клеточным механизмам восстановления функций мозга после травмы и других повреждений. Так было показано, что при ЧМТ некоторые из развивающихся в мозге дезинтегративных процессов являются обратимыми и могут восстанавливаться спонтанно за счет нейропластического потенциала головного мозга [7, 8]. Воздействие специальных реабилитационных подходов, включающих активные двигательные нагрузки или их сочетание с когнитивными нагрузками, может способствовать восстановлению полноценного взаимодействия между структурами мозга [9, 10]. Возможно, что усиленный нейрогенез в сочетании с

восстановлением (или подключением) дополнительных проводящих путей способствует функциональному восстановлению после ЧМТ [11, 12].

В настоящее время для оценки функционального состояния головного мозга человека в норме и при различных формах патологии используются разные подходы. Одним из первых методов, который начал активно применяться в клинической практике, является метод электроэнцефалографии. В настоящее время в связи с развитием новых технологий в медицине и нейронауках наиболее популярными становятся методы нейровизуализации, которые позволяют практически в режиме реального времени наблюдать за процессами, происходящими в головном мозге. К ним относится метод функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ), который обладает высоким пространственным разрешением. Данный метод, основанный на анализе изменений оксигенации крови в активируемых участках головного мозга при нагрузках, позволяет получить точные маркеры включения различных церебральных структур в осуществление той или иной функции [13–15]. Большая часть работ с использованием фМРТ получена на здоровых испытуемых, что позволило углубить представления о структурных особенностях реактивных перестроек мозга человека при осуществлении различных функций. В частности, ранее были проведены исследования, посвященные анализу гемодинамических перестроек мозга при двигательных нагрузках у здоровых людей [16–19]. Было показано, что у здоровых испытуемых наибольшая локальность и воспроизводимость фМРТ-ответов выявляется при сжатии пальцев в кулак по сравнению с другими моторными нагрузками, например с перебором пальцев [18]. Это позволило использовать данную двигательную парадигму как наиболее адекватную при исследовании пациентов с ЧМТ.

Использование метода фМРТ при исследовании больных с ЧМТ раскрывает новые возможности в изучении особенностей функциональной анатомии мозга при данной форме патологии. В предыдущих исследованиях анализировались реактивные фМРТ перестройки для правой руки у пациентов с ЧМТ без гемипареза [20]. В настоящем исследовании важно сравнить особенности реактивных перестроек, при движении, как ведущей, так и неведущей рукой у здоровых людей, а затем на основе этих данных изучить характер их изменений у пациентов с ЧМТ. Важно отметить, что анализ гемодинамических перестроек у пациентов без гемипарезов, без локальных очагов поражения в сенсомоторной коре и в других отделах мозга, представляет особый интерес, так как является адекватной моделью для изучения динамики развития и восстановления церебральных функций у пациентов с травматическим повре-

ждением мозга. Помимо этого такой анализ позволяет подойти к пониманию базисных механизмов поражения мозга при данной форме церебральной патологии. В имеющихся литературных источниках, как правило, анализировались фМРТ-данные пациентов с более грубыми нарушениями, в том числе с гемипарезами. Именно поэтому целью настоящего исследования явилось изучение особенностей реактивных перестроек фМРТ-ответов при выполнении двигательных нагрузок правой и левой рукой у пациентов с ЧМТ без гемипарезов по сравнению со здоровыми испытуемыми.

МЕТОДИКА

В исследовании приняли участие 20 здоровых человек (11 мужчин, 9 женщин, средний возраст 25.1 ± 3.9 лет). В группу пациентов вошли 9 человек с ЧМТ (6 мужчин, 3 женщины, средний возраст 27.9 ± 7.3 лет) с ведущей правой рукой, отсутствием гемипарезов, локальных очагов поражения в сенсомоторной коре и других отделах мозга, а также без нарушений сознания на момент исследования. Преобладание мужчин, в группе пострадавших от ЧМТ по сравнению с женщинами, соответствует отечественной и международной статистике для пациентов с травматическим поражением мозга [1]. Из общего числа пациентов 3 человека имели признаки негрубых деструктивных изменений по данным МРТ в левом полушарии, 3 человека — в правом и 3 человека — в обоих. У всех испытуемых, согласно опроснику Аннет, ведущей была правая рука. Каждый испытуемый давал информированное согласие на участие в исследовании, одобренное этическим комитетом ИВНД и НФ РАН. Обследование и лечение пациентов проводили в НИИ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко.

фМРТ-исследование выполняли при закрытых глазах испытуемых на МР-томографе *General Electric Signa HDxt* (США) с напряженностью магнитного поля 3 Т. В качестве функциональной пробы использовали сжатие-разжимание пальцев раздельно правой и левой руки в кулак. Запись осуществляли по блоковой парадигме, состоящей из чередования периодов покоя и выполнения двигательной пробы длительностью по 30 с. Усредняли результаты пятикратного применения каждой пробы. Данные фМРТ обрабатывали в программе *SPM8* на базе *Matlab R2014a* на индивидуальном и групповом уровнях. Коррекцию артефактов движения выполняли по стандарту *generalized linear model (GLM)*. Для построения карт активации на индивидуальном уровне использовали статистические пороги на уровне вокселей $p < 0.001$ (*unc.*) с скорректированным порогом уровня значимости кластеров $p(FWE-corr) < 0.01$. Усреднение по группе проводили по одностороннему одновыборочному *t*-крите-

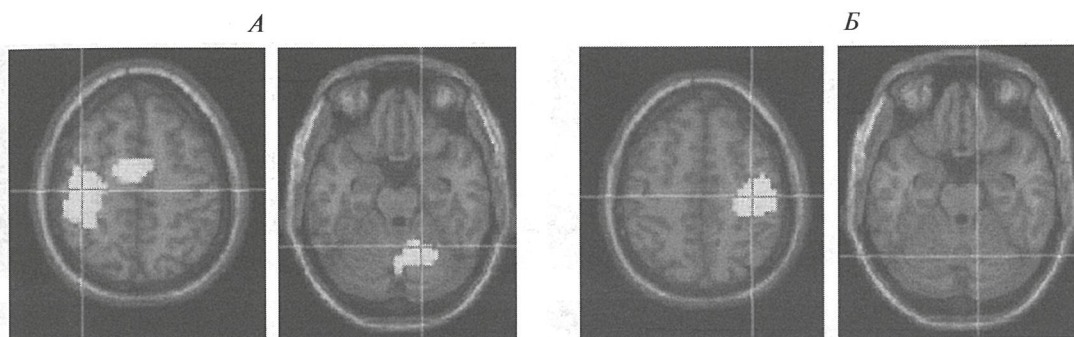


Рис. 1. Усредненные по группе здоровых испытуемых фМРТ-ответы при движении правой (А) и левой (Б) рукой. $n = 20$, $t = 3.53$; $p(unc) < 0.001$, с кластерной поправкой на множественные сравнения $p(FWE-corr) < 0.05$.

рию (*one-sample t-test*). Для сравнения независимых выборок между собой использовали двухвыборочный *t*-критерий. Для анализа групповых карт активации для каждой группы отдельно использовали статистические пороги на уровне вокселей $p < 0.001$ (*unc.*) с скорректированным порогом уровня значимости кластеров $p(FWE-corr) < 0.05$. При сравнении групп пациентов с ЧМТ и здоровых испытуемых воксельный порог соответствовал $p < 0.001$ (*unc.*) с скорректированным порогом уровня значимости кластеров $p(FWE-corr) < 0.01$.

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 R2014a* [19]. Структуры в полученных таблицах объединили в более крупные структурно-функциональные единицы. Так в моторную зону вошли *gyrus Precentralis* и *Paracentral lobula*; в лобную — *Frontal Sup.*, *SupraMargina*, *Frontal Mid*, аналогично и для остальных областей. В программе *Statistica 6.0* с использованием критерия Стьюдента сравнивали объемы активированных областей мозга у группы здоровых испытуемых и пациентов с ЧМТ. Для достоверно значимых изменений подсчитали нормированное увеличение объемов в % у пациентов с ЧМТ по сравнению со здоровыми испытуемыми.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Групповой анализ гемодинамических перестроек мозга, проведенный у здоровых испытуемых (рис. 1, А), показал, что при сжимании пальцев правой руки в кулак главным образом активируется сенсомоторная кора контралатерального по отношению к работающей руке полушария, расположенная в пре- и постцентральной извилинах, дополнительная моторная область, расположенная в медиальных отделах верхней лобной извилины, а также ипсилатеральное полушарие мозжечка и червь. Анализ среднегрупповых

фМРТ-ответов при выполнении движения левой рукой (рис. 1, Б) выявил только одну основную зону активации — в сенсомоторной области контралатерального, правого полушария. Это можно объяснить тем, что при движении неведущей, левой рукой индивидуальные фМРТ-ответы характеризуются большей вариабельностью по сравнению с фМРТ-ответами при работе правой рукой (рис. 2). При этом у одних испытуемых отсутствует зона активации в ипсилатеральном полушарии мозжечка, у других, наоборот, дополнительно включается сенсомоторная кора ипсилатерального полушария и дополнительная моторная область. Стоит отметить, что у большинства испытуемых в ипсилатеральном полушарии мозжечка выявляется зона активации на индивидуальных фМРТ-ответах, но объем зоны активации и ее локализация различались.

При сравнении фМРТ-реакций группы пациентов и здоровых испытуемых наибольшие различия были выявлены при работе правой, ведущей рукой (рис. 3, А). У пациентов фМРТ-ответы характеризуются наличием диффузного компонента, в то время как у здоровых испытуемых они имеют большую локальность. Помимо этого у пациентов с ЧМТ по сравнению со здоровыми испытуемыми в реакцию достоверно больше вовлекаются подкорковые структуры, а также различные “неспецифические” зоны коры контралатерального полушария, которые не характерны для двигательного ответа в норме.

При выполнении движения левой рукой достоверных различий фМРТ-ответов между группой пациентов с ЧМТ и здоровых испытуемых в целом выявлено не было (рис. 3, Б), однако незначительные различия наблюдались в затылочных областях коры и подкорковых структурах; кроме того объемы фМРТ-ответов были несколько больше в группе пациентов по сравнению со здоровыми испытуемыми.

Индивидуальные фМРТ-ответы у пациентов с ЧМТ демонстрируют высокую межиндивидуаль-

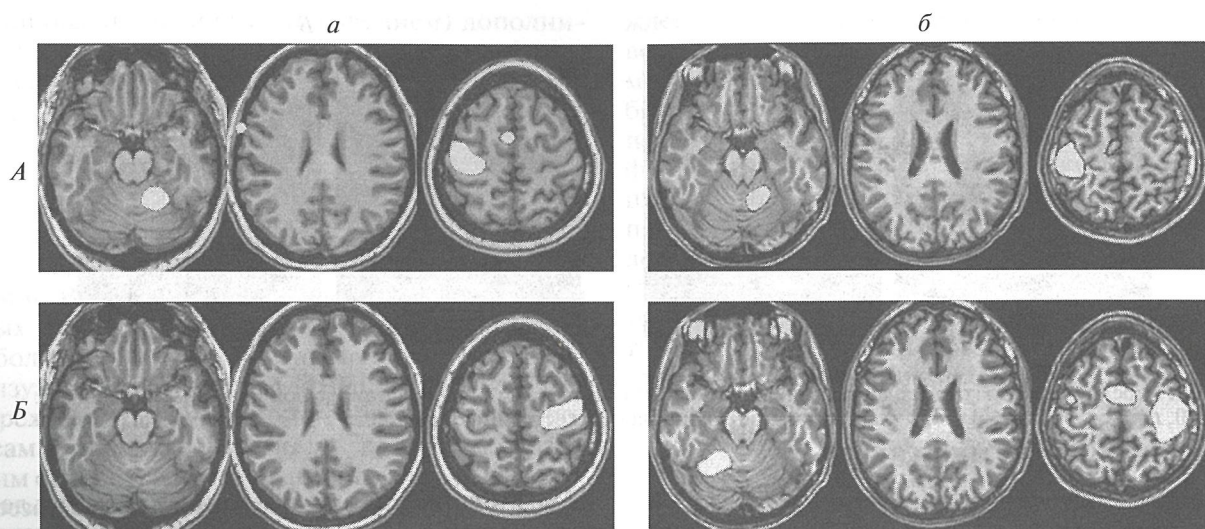


Рис. 2. Примеры индивидуальных фМРТ-ответов у здоровых испытуемых при движении правой (А) и левой (Б) рукой. а – исп. Ш., б – исп. Г. Остальные обозначения см. рис. 1.

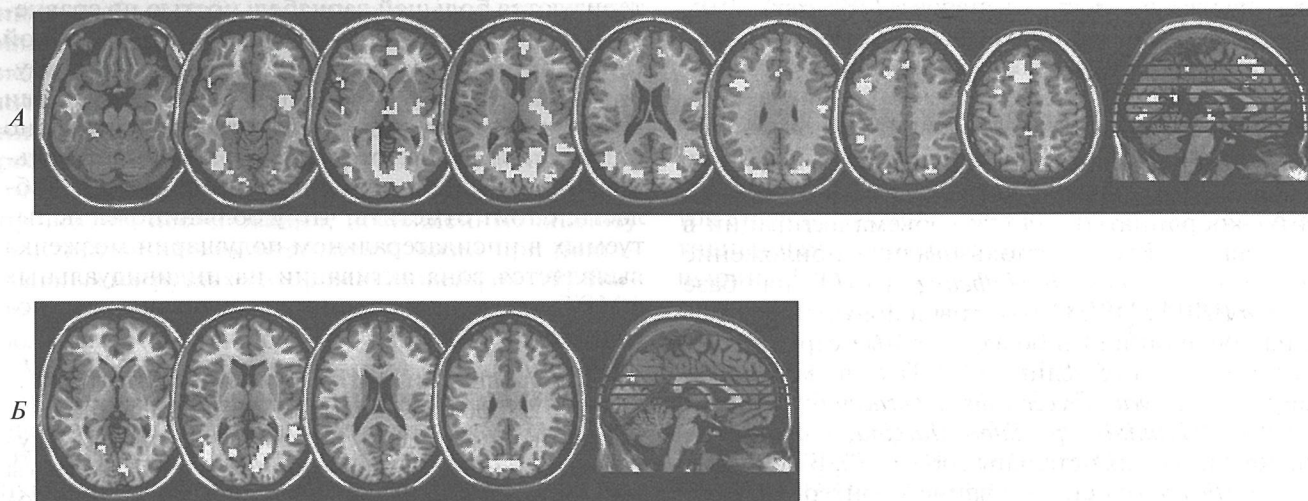


Рис. 3. Результаты сопоставления фМРТ-ответов при движении правой (А) и левой (Б) рукой у больных по сравнению со здоровыми испытуемыми.

Для правой руки сопоставление проводилось с $p(unc) < 0.001$ и кластерной поправкой на множественные сравнения $p(FWE-corr) < 0.01$ (группа пациентов > группы здоровых испытуемых). Остальные обозначения см. рис. 1.

ную вариабельность, однако у всех пациентов по сравнению со здоровыми людьми выявлена диффузная форма реагирования мозга, в большей степени выраженная при выполнении движения правой, ведущей рукой (рис. 4). У пациентов при данной нагрузке наблюдается вовлечение большего числа структур мозга по сравнению с нормой; этот эффект проявляется как в контра-, так и в ипсилатеральном полушарии. При движении левой рукой у пациентов с ЧМТ выявляется меньшее число отличительных признаков в фМРТ-ответах по сравнению со здоровыми испытуемыми (рис. 4, Б).

Статистический анализ фМРТ-ответов в различных структурах мозга также показал, что наибольшие их изменения наблюдаются в контралатеральном полушарии при выполнении движения правой рукой. У пациентов объем ответа моторной коры, дополнительной моторной зоны и червя мозжечка значительно больше, чем у здоровых испытуемых. Помимо этого, у них в большей степени включаются такие зоны, как подкорковые ядра, таламус и лимбическая система, а также некоторые области коры больших полушарий, несвойственные “двигательному” ответу у здоровых людей (височные, затылочные) (рис. 5,

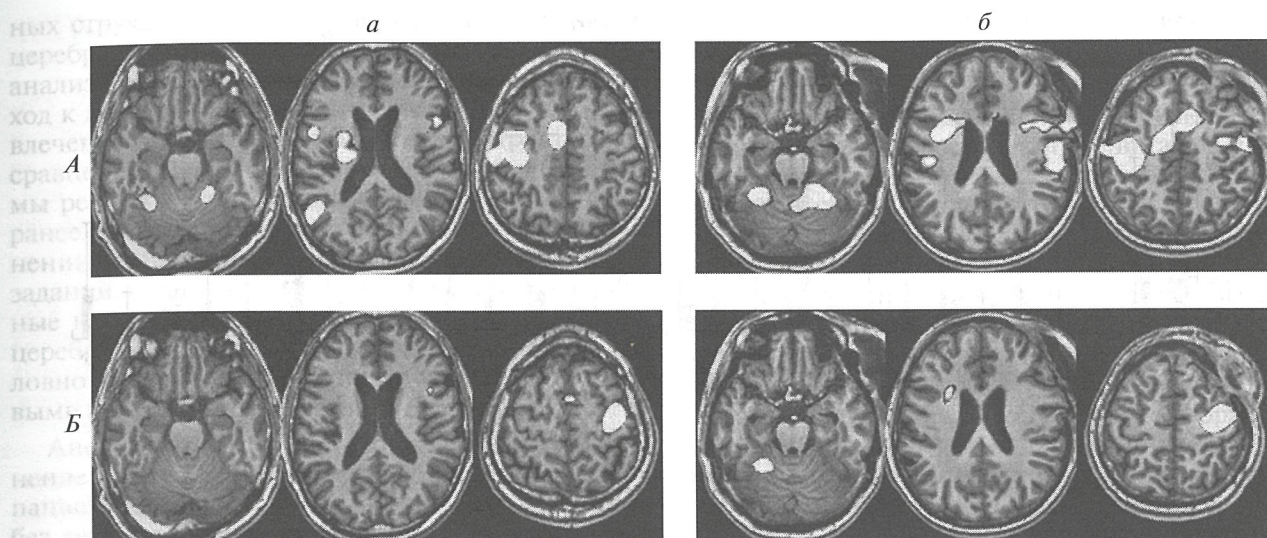


Рис. 4. Примеры индивидуальных фМРТ-ответов у пациентов с ЧМТ при движении правой (А) и левой (Б) рукой. а – пациент К., б – пациент С. $p < 0.001$ (unc.) с кластерной поправкой $p(FWE-corr) < 0.01$. Остальные обозначения см. рис. 1.

А-І, табл. 1). В отличие от этого в ипсилатеральном полушарии у пациентов наблюдается небольшое увеличение объемов фМРТ-ответа многих структур, но эти отличия не были достоверными (рис. 5, Б-І). При работе левой рукой у пациентов по сравнению с нормой изменения незначительны как в контралатеральном, так и в ипсилатеральном полушарии для большинства отделов мозга; достоверно значимое увеличение объема фМРТ-ответов наблюдается только в затылочной области в обоих полушариях (рис. 5, ІІ, табл. 2).

Помимо этого была вычислена степень изменений у пациентов с ЧМТ по сравнению со здоровыми испытуемыми, а также нормированное увеличение объемов фМРТ-ответов для различ-

ных областей коры и подкорковых структур (табл. 1 и 2). Было показано, что у пациентов изменения фМРТ-ответов в подкорковых структурах и неспецифических областях коры были более выраженными, чем в корковых проекционных зонах. Так, при движении правой рукой у пациентов в сравнении с контрольной группой объемы фМРТ-ответов в моторной и дополнительной моторной зоне контралатерального полушария становились больше на 20 и 33%, соответственно, а объемы фМРТ-ответов неспецифических областей коры (височные и затылочные) и подкорковых ядер больше на 70 и 90% (табл. 1). При движении левой рукой у пациентов с ЧМТ наблюдалось увеличение объема фМРТ-ответов в затылочной области контр- и ипсилатерального полушария на 80 и 70%, соответственно (табл. 2).

Таблица 1. Результаты сравнения объемов фМРТ-ответов в разных структурах мозга (в вокселях) по критерию Стьюдента между группами здоровых испытуемых и пациентов с ЧМТ при движении правой рукой (показаны различия на 5% уровне)

Область мозга	Среднее по здоровым испытуемым	Среднее по пациентам	t -значение	p	Нормированное увеличение объемов в %
Моторная кора (контр)	118.6375	166.5468	-2.07764	0.046703	20
Дополнительная моторная зона (контр)	23.0411	46.8741	-2.11152	0.043464	33
Затылочная кора (контр)	7.2726	55.8213	-2.39719	0.023187	70
Височная кора (контр)	8.0861	57.6505	-2.68583	0.011844	70
Червь мозжечка	15.9089	52.0101	-2.28924	0.029534	50
Таламус (контр)	3.8184	28.7676	-2.31113	0.028132	75
Подкорковые ядра (контр)	1.5001	45.4359	-2.34546	0.026054	90
Лимбическая система (контр)	8.1834	46.7075	-2.38106	0.024048	70

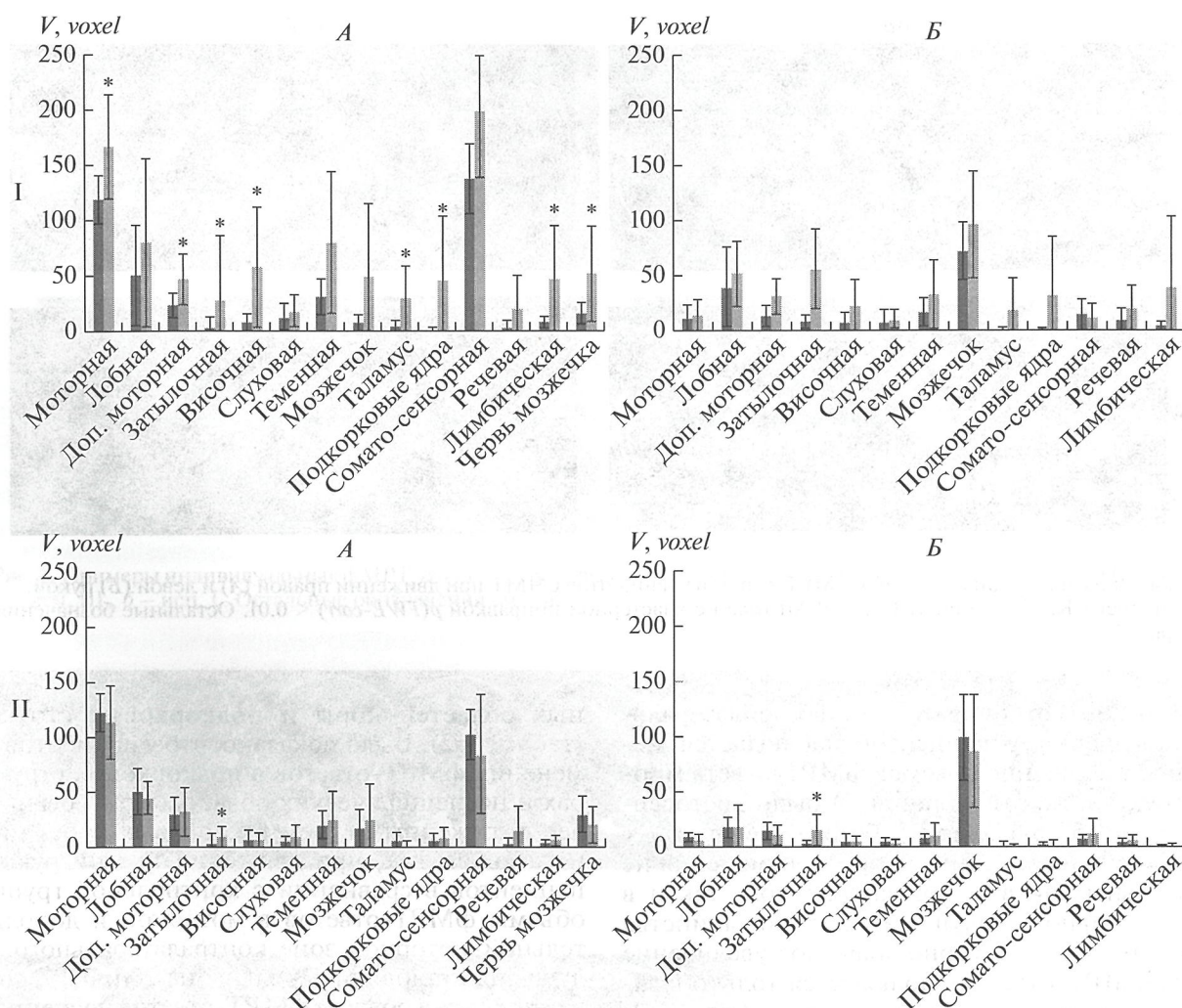


Рис. 5. Средние объемы фМРТ активации отдельных мозговых структур у пациентов с ЧМТ по сравнению с нормой. I – средние объемы фМРТ активации при движении правой, II – левой рукой; А – в контралатеральном, Б – в ипсилатеральном полушарии; * – $p < 0.05$. Черные столбики – норма, серые – пациенты с ЧМТ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

У здоровых испытуемых при движении левой рукой выявлена большая межиндивидуальная вариабельность фМРТ-ответов по сравнению с правосторонней нагрузкой. Можно предположить, что менее привычное для правойшей выполнение движений левой рукой характеризуется

меньшей структурной детерминированностью в формировании ответа.

Анализ гемодинамических перестроек мозга при двигательных нагрузках у пациентов с ЧМТ при отсутствии гемипарезов позволил выявить нарушения многоуровневого характера системного обеспечения движений с участием различ-

Таблица 2. Результаты сравнения объемов фМРТ-ответов разных областей мозга (в вокселях) по критерию Стьюдента между группами здоровых испытуемых и пациентов с ЧМТ при движении левой рукой (показаны различия на 5% уровне)

Область мозга	Среднее по здоровым испытуемым	Среднее по пациентам	t-значение	p	Нормированное увеличение объемов в %
Затылочная кора (контр)	1.4539	9.3351	–2.52321	0.017367	80
Затылочная кора (ипси)	2.6352	14.6665	–2.39777	0.023156	70

ных структур мозга в условиях травматического церебрального поражения. Результаты фМРТ-анализа у исследованных больных выявили переход к диффузному варианту фМРТ-ответов с вовлечением большего количества структур по сравнению с нормой. Переход от локальной формы реагирования мозга к диффузной отмечался ранее другими авторами, например, при выполнении двигательных [19] и пространственных [18] заданий у пациентов с ЧМТ. Сходные реактивные изменения выявлены и при других формах церебральной патологии, таких как опухоли головного мозга [21, 22], а также у больных с речевыми расстройствами различного генеза [23].

Анализ структур мозга, вовлеченных в выполнение моторных нагрузок правой и левой рукой у пациентов с травматическим поражением мозга без гемипарезов, показал, что у них в большей степени, чем у здоровых людей, вовлекаются неспецифические корковые и особенно подкорковые структуры. Вероятно, это отражает специфику включения компенсаторных процессов, необходимых для осуществления двигательных функций у пациентов с данной формой церебральной патологии. Согласно представлениям Н.П. Бехтеревой о наличии в ЦНС не только жестко фиксированных функциональных связей, но и более гибких, обладающих значительными степенями свободы и активизирующихся при патологии [24], можно полагать, что выявленные особенности формирования реактивных перестроек у пациентов с ЧМТ отражают компенсаторное включение в этот процесс в большей степени глубоких отделов мозга.

Интересно отметить в данной работе то, что при травматическом поражении мозга без локального очагового поражения наибольшие структурно-функциональные патологические изменения выявляются в доминантном (по руке) полушарии. Сходная закономерность ранее была отмечена при инсультах у пациентов, которые чаще проявлялись в левом полушарии [25]. Наиболее чувствительным левое полушарие оказалось и к воздействию таких неблагоприятных факторов, как малые дозы радиации. В частности, показано, что у молодых участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС выявлено уменьшение межполушарной асимметрии мозга по сравнению с нормой соответствующего возраста. Эти изменения проявлялись преимущественно за счет снижения функционального состояния левого полушария [26]. Известно также, что у здоровых правшей при старении уменьшение асимметрии головного мозга происходит в основном за счет снижения реактивности доминантного, левого полушария [25]. Существует *HAROLD*-гипотеза старения (*hemispheric asymmetry reduction at old age*) мозга человека, предложенная R. Cabeza [27], которая также объясняет процесс

старения мозга человека за счет преимущественного снижения функциональной активности левого полушария.

Таким образом, выявленные нарушения реактивных фМРТ-перестроек при двигательных нагрузках у пациентов с последствиями ЧМТ могут свидетельствовать о том, что при травме в первую очередь страдают корковые области, наиболее новые в эволюционном ряду образования мозга. Кроме того, данные фМРТ косвенно указывают и на то, что у правшей в большей степени страдает доминантное, левое полушарие, также более молодое в онтогенетическом плане по сравнению с правым полушарием. Полученные авторами данные требуют проведения дальнейших исследований с применением различных функциональных нагрузок и более детального изучения структурной МРТ. Помимо этого, для более убедительного подтверждения полученных результатов необходимо также проведение дополнительных исследований с увеличением группы пациентов с данной формой церебральной патологии. Однако уже на данном этапе работы можно полагать, что увеличение объема и числа активированных структур мозга в случаях патологии могут отражать включение компенсаторных процессов, необходимых для осуществления двигательных функций у пациентов с последствиями ЧМТ.

Суммируя вышесказанное, можно предположить, что при травматическом поражении мозга у правшей наиболее выраженная патологическая реакция по данным фМРТ проявляется в доминантном, левом полушарии по сравнению с субдоминантными в корковых структурах по сравнению с подкорковыми. Это согласуется с результатами других исследований и подтверждает представления об общебиологическом характере реагирования более молодых в онтогенетическом плане структур мозга на неблагоприятные факторы окружающей среды.

ВЫВОДЫ

1. У здоровых испытуемых при выполнении движений левой рукой выявлена большая, по сравнению с правосторонней нагрузкой, межиндивидуальная вариабельность топографии основных зон активации в фМРТ-ответах.

2. У пациентов-правшей с ЧМТ в фМРТ-ответах при двигательных пробах наблюдалось нарастание диффузного компонента с вовлечением большего числа структур мозга, включающих неспецифические для двигательного анализатора области коры и подкорковые образования, что наиболее отчетливо выражалось в доминантном, левом полушарии (при выполнении движения правой, ведущей рукой).

Поддержано РФФИ (грант № 18-013-00355).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Потанов А.А., Рошаль Л.М., Лихтерман Л.Б., Кравчук А.Д.* Черепно-мозговая травма: проблемы и перспективы // Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко. 2009. Т. 2. С. 3.
2. *Bigler E.D., Wilde E.A.* Quantitative neuroimaging and the prediction of rehabilitation outcome following traumatic brain injury // *Frontiers in human neuroscience*. 2010. Т. 4. № 3. P. 228.
3. *Marshall L.F.* Head injury: recent past, present, and future // *Neurosurgery*. 2000. V. 47. № 3. P. 546.
4. *Levine B., Fujiwara E., O'Connor C. et al.* In vivo characterization of traumatic brain injury neuropathology with structural and functional neuroimaging // *Journal of Neurotrauma*. 2006. V. 23. № 10. P. 1396.
5. *Vos P.E., Bigler E.D.* White matter in traumatic brain injury Dis- or dysconnection? // *Neurology*. 2011. V. 77. № 9. P. 810.
6. *Quinn B., Sullivan S.J.* The identification by physiotherapists of the physical problems resulting from a mild traumatic brain injury // *Brain Injury*. 2000. V. 14. № 12. P. 1063.
7. *Sidaros A., Engberg A., Sidaros K. et al.* Diffusion tensor imaging during recovery from severe traumatic brain injury and relation to clinical outcome: a longitudinal study // *Brain*. 2008. V. 131. № 2. P. 559.
8. *Sidaros A., Skimminge A., Liptrot M.G. et al.* Long-term global and regional brain volume changes following severe traumatic brain injury: a longitudinal study with clinical correlates // *Neuroimage*. 2008. V. 44. № 1. P. 1.
9. *Bolognini N., Pascual-Leone A., Fregni F.* Using non-invasive brain stimulation to augment motor training-induced plasticity // *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*. 2009. V. 6. № 1. P. 8.
10. *Gao X., Enikolopov G., Chen J.* Moderate traumatic brain injury promotes proliferation of quiescent neural progenitors in the adult hippocampus // *Experimental Neurology*. 2009. V. 219. № 2. P. 516.
11. *Curtis M.A., Kam M., Nannmark U. et al.* Human neuroblasts migrate to the olfactory bulb via a lateral ventricular extension // *Science*. 2007. V. 315. № 16. P. 1243.
12. *Kernie S.G., Parent J.M.* Forebrain neurogenesis after focal Ischemic and traumatic brain injury // *Neurobiology of Disease*. 2010. V. 37. № 2. P. 267.
13. *Babiloni F., Babiloni C., Carducci F. et al.* Multimodal integration of high-resolution EEG and functional magnetic resonance imaging data: a simulation study // *NeuroImage*. 2003. V. 19. № 1. P. 1.
14. *Mulert C., Lemieux L.* EEG-fMRI Physiological Basis, Technique and Applications. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 539 p.
15. *Штарк М.Б., Коростышевская А.М., Резакова М.В., Савелов А.А.* Функциональная магнитно-резонансная томография и нейронауки // *Успехи физиологических наук*. 2012. Т. 43. № 1. С. 3.
16. *Болдырева Г.Н., Жаворонкова Л.А., Шарова Е.В. и др.* фМРТ-ЭЭГ исследование реакций мозга здорового человека на функциональные нагрузки // *Физиология человека*. 2009. Т. 35. № 3. С. 20.
17. *Шарова Е.В., Мигалев А.С., Куликов М.А. и др.* Сопоставление реактивных изменений ЭЭГ и фМРТ-характеристик мозга здорового человека на основе многомерной статистики // *Журнал высшей нервной деятельности*. 2012. Т. 62. № 20. С. 143.
18. *Болдырева Г.Н., Шарова Е.В., Жаворонкова Л.А. и др.* Сопоставление фМРТ-реакций мозга здоровых людей при активных, пассивных и воображаемых движениях рукой // *Медицинская визуализация*. 2015. № 5. С. 100.
19. *Evans A., Collins D., Milner B.* An MRI-based stereotactic atlas from 250 young normal subjects // *J. Soc. Neurosci. Abstr.* 1992. V. 18. P. 408.
20. *Мухина Т.С., Шарова Е.В., Болдырева Г.Н. и др.* Особенности нейроанатомии активных движений руки у пациентов с тяжелой черепно-мозговой травмой (анализ данных функциональной магнитно-резонансной томографии) // *Журн. неврологии, нейропсихиатрии, психосоматики*. 2017. Т. 9. № 1. С. 27.
21. *Zhang K., Johnson B., Pennell D. et al.* Are functional deficits in concussed individuals consistent with white matter structural alterations: combined FMRI & DTI study // *Experimental Brain Research*. 2010. V. 204. № 1. P. 57.
22. *Болдырева Г.Н., Жаворонкова Л.А., Шарова Е.В. и др.* ЭЭГ-фМРТ анализ функциональной специализации мозга человека в норме и при церебральной патологии // *Медицинская визуализация*. 2012. № 1. С. 16.
23. *Купцова С.В., Петрушевский А.Г., Федина О.Н., Жаворонкова Л.А.* фМРТ-исследование особенностей функциональной активности мозга при произвольном переключении внимания у пациентов с речевыми расстройствами // *Медицинская визуализация*. 2016. № 4. С. 5.
24. *Бехтерева Н.П.* Здоровый и больной мозг человека. Л.: Наука, 1988. 260 с.
25. *Брагина Н.Н., Доброхотова Т.А.* Функциональные асимметрии человека. М.: Медицина, 1981. 287 с.
26. *Жаворонкова Л.А., Белостоцкий А.П., Холодова Н.Б. и др.* Нарушения высших психических функций и когнитивных слуховых вызванных потенциалов у ликвидаторов Чернобыльской аварии // *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2012. Т. 112. № 5. С. 62.
27. *Cabeza R.* Cognitive neuroscience of aging: contributions of functional neuroimaging // *Scandinavian journal of psychology*. 2002. V. 42. № 3. P. 277.

fMRI-Reactions in Motor Tasks Performed by Patients with Traumatic Brain Injury

**L. A. Zhavoronkova*, S. I. Moraresku, G. N. Boldyreva, E. V. Sharova,
S. V. Kuptsova, A. S. Smirnov, E. L. Masherov, I. N. Pronin**

**E-mail: lzhavoronkova@hotmail.com*

The study included 22 healthy right-handed subjects (age 25.1 ± 3.9) and 9 patients with traumatic brain injury (TBI) (age 27.9 ± 7.3) without hemiparesis and local lesions in the sensorimotor cortex. The hemodynamical brain reactions were analyzed using functional magnetic resonance imaging (fMRI) during right- and left-hand movements. It was shown that reactive changes of responses have larger inter-individual variability of the main topographic activation zones during left-hand movements as compared with right-hand movements in healthy subjects. In the TBI patients, the diffuse component of reactive changes was increased and involved a larger number of brain structures — cortex areas and subcortical formations, including zones nonspecific for the motor analyzer. These changes were most clearly expressed in the dominant hemisphere (during movement of the right hand).

Keywords: fMRI, traumatic brain injury, right- and left-hand movements.