

УДК 57.084.1:612.821.6

**ОСОБЕННОСТИ ЦЕРЕБРАЛЬНЫХ ГЕМОДИНАМИЧЕСКИХ
ОТВЕТОВ ПРИ РЕАЛЬНОМ И ВООБРАЖАЕМОМ ДВИЖЕНИИ
У ПАЦИЕНТОВ С НАЛИЧИЕМ И ОТСУТСТВИЕМ
АСПОНТАННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ
ПОСЛЕ ЧЕРЕПНО-МОЗГОВОЙ ТРАВМЫ**

**¹Шарова Е.В., ²Каверина М.Ю., ¹Кулева А.Ю., ¹Болдырева Г.Н., ²Смирнов А.С.,
¹Жаворонкова Л.А., ¹Купцова С.В., ²Трошина Е.М.**

¹ФГБУН «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН»,
Москва, e-mail: esharova@nsi.ru;

²ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии
имени академика Н.Н. Бурденко» Минздрава России, Москва

К числу важных составляющих поведения человека относится спонтанность, т.е. способность активно действовать под влиянием внутренних побуждений. Ее нарушения (аспонтанность) могут затруднять процесс нейрореабилитации пациентов с черепно-мозговой травмой. Объективные маркеры аспонтанности поведения, включая данные нейровизуализации, исследованы недостаточно. Для тестирования нейроанатомических основ спонтанности/аспонтанности адекватным представляется исследование воображаемого выполнения движения методом функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ). Цель работы – выявление особенностей церебрального структурно-функционального обеспечения воображаемого движения руки у пациентов с черепно-мозговой травмой (n = 12, возраст 27,33±9,8 лет) при наличии и отсутствии признаков аспонтанности поведения – на основе сопоставления с нормой (n = 13, возраст 24,5±5 лет). фМРТ 3Т записывали при сжимании-разжимании пальцев правой руки в кулак, а также при мысленном представлении выполнения этого движения. Выявлено, что у пациентов с ЧМТ без аспонтанности поведения (n = 12) основные черты нейроанатомии «воображаемого» фМРТ-ответа, хотя и ослабленного, обедненного по составу по сравнению с нормой, сходны со здоровыми испытуемыми: активация разных отделов правой гемисферы, а также прецентральной коры обоих полушарий. Характерной для пациентов с аспонтанностью (n = 4) является ограниченность «воображаемого» фМРТ-ответа либо дополнительной моторной корой, либо в ее сочетании с активацией прецентральной или теменной коры только правого полушария. Полагаем, что указанная ограниченность «воображаемого» гемодинамического ответа при ареактивности левой гемисферы относится к числу фМРТ маркеров аспонтанности поведения у пациентов с ЧМТ.

Ключевые слова: аспонтанность поведения, функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ), реальное и воображаемое движение, черепно-мозговая травма

**PECULIARITIES OF fMRI RESPONSES DURING REAL AND IMAGINARY
MOVEMENTS IN PATIENTS WITH AND WITHOUT BEHAVIOR
ASPONTANEITY AFTER TRAUMATIC BRAIN INJURY**

**¹Sharova E.V., ²Kaverina M.Yu., ¹Kuleva A.Yu., ¹Boldyreva G.N., ²Smirnov A.S.,
¹Zhavoronkova L.A., ¹Kuptsova S.V., ²Troshina E.M.**

¹*Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS, Moscow, e-mail: esharova@nsi.ru;*

²*Federal State Autonomous Institution “N.N. Burdenko National Medical Research Center
of Neurosurgery” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow*

Spontaneity is one of the important components of human behavior, i.e. the ability to act actively under the influence of internal motives. Its violations (aspontaneity) can impede the process of neurorehabilitation of patients with traumatic brain injury. Objective markers of aspontaneity, including neuroimaging data, have not been adequately studied. The most suitable method for studying the neuroanatomy of spontaneity/aspontaneity seems to be the fMRI method with the task of imaginary movement, which implies that a person understands the conditions of the task, retains it in memory, and is included in the task. The aim of this work is to compare fMRI responses to real and imaginary hand movements in patients with traumatic brain injury (n = 12, age 27.33 ± 9.8 years) with and without signs of spontaneous behavior compared with healthy controls (n = 13, age 24.5 ± 5 years). 3T fMRI was recorded while clenching and unclenching the fingers of the right hand into a fist, as well as while imagining the execution of this movement. It was found that in patients with TBI without behavior aspontaneity (n = 12), the main features of the neuroanatomy of the “imaginary” fMRI response, although weakened, depleted in composition compared to the healthy controls, are similar to them: activation of different parts of the right hemisphere, as well as the precentral cortex of both hemispheres. Characteristic for patients with aspontaneity (n = 4) is the limitation of the “imaginary” fMRI response either to the additional motor cortex, or in combination with activation of the precentral or parietal cortex of only the right hemisphere. We suppose that the indicated limitation of the “imaginary” hemodynamic response in the presence of unresponsiveness of the left hemisphere is one of the fMRI markers of behavior aspontaneity in patients with TBI.

Keywords: behavior aspontaneity, fMRI, real and imaginary movement; traumatic brain injury

Важнейшей составляющей психической деятельности человека является спонтанность (лат. *spontaneus* – самопроизвольный) – способность активно действовать под влиянием внутренних побуждений [1]. Это свойство характерно для человека с достаточно высоким уровнем сознания и коммуникативных возможностей, мысли и действия которого, по мнению И.М. Сеченова, «направлены делом, мотивом». В то же время разные формы церебральной патологии могут сопровождаться нарушениями этой способности [2] или аспонтанностью (АСП), т.е. нарушением программируемого целенаправленного поведения, внутренней бездеятельностью пациента, существенно затрудняя процесс нейрореабилитации. Наличие АСП связывается в литературе с дисфункцией (повреждением) медиальных отделов лобных, а также теменно-затылочных областей мозга [3].

Выявление признаков АСП возможно при общении пациента с врачом (нейропсихологом) либо с помощью специальных нейропсихологических тестов [4]. Вместе с тем объективные маркеры, как спонтанности поведения, так и нарушений этого свойства, базирующиеся на нейрофизиологических или нейровизуализационных методах, исследованы недостаточно.

В нашей предыдущей работе по определению нейрофизиологических коррелятов произвольного компонента двигательного акта [5] было проведено сопоставление ЭЭГ-ответов в задачах «сжатие-разжатие пальцев руки в кулак» и «обратный счет в уме» у здоровых испытуемых. Выявлено, что топографические паттерны когерентности ЭЭГ, сходные для обоих тестов в норме (изменения в лобных корковых областях, преобладающие слева, а также в симметричных теменных отделах), нарушались при аспонтанности поведения после черепно-мозговой травмы (ЧМТ). Отличия от нормы заключались в отсутствии согласованных билатеральных изменений когерентности в симметричных лобно-полюсных корковых областях и выраженном ослаблении реактивности в теменной зоне, сконцентрированной при патологии справа. Выявленные пространственные паттерны ЭЭГ, согласующиеся по топографии с данными литературы [3], были отнесены к числу нейрофизиологических маркеров произвольности двигательного акта.

Можно полагать, что более сложной задачей для пациентов с аспонтанностью является не реальное выполнение моторного акта разной сложности, а его представление. Эта парадигма подразумевает понима-

ние человеком условия задачи, ее удержание в памяти и включенность в задание. Кроме того, предполагается, что человек хорошо представляет схему своего тела и способен мысленно воспроизвести именно движение, а не его стороннее созерцание. Показана эффективность приема мысленного представления движений для нейрореабилитации разных форм церебральной патологии [6, 7]. При использовании данного теста в норме и при патологии многие исследователи для лучшего представления о структурно-функциональном церебральном обеспечении реализации воображения движения привлекают метод фМРТ [8], обладающий лучшим пространственным разрешением по сравнению с ЭЭГ.

Цель работы – выявление особенностей церебрального структурно-функционального обеспечения воображаемого движения руки у пациентов с черепно-мозговой травмой при наличии и отсутствии признаков аспонтанности поведения.

Задачи работы: 1) исследовать фМРТ-ответы при реальном и воображаемом движении руки у пациентов с черепно-мозговой травмой а) при наличии и б) при отсутствии признаков аспонтанности поведения; 2) сопоставить двигательные фМРТ-ответы пациентов и здоровых испытуемых.

Материалы и методы исследования

Основную группу наблюдений составили 12 пациентов (мужчины в возрасте $27,33 \pm 9,8$ лет), обследованных в период от 1 недели до 11 месяцев после ЧМТ. Клинически травма расценивалась как тяжелая или среднетяжелая (4 наблюдения). По данным структурной нейровизуализации (КТ, МРТ), она сопровождалась множественными повреждениями головного мозга: различные варианты ушибов с отеком, интракраниальные гематомы (у 8 пациентов) в сочетании с диффузным аксональным повреждением (ДАП).

При исследовании все пациенты были доступны контакту и способны выполнять простые двигательные акты по инструкции врача. Согласно нейропсихологической оценке (беседа с пациентом и родственниками), у 4 человек выявлялась аспонтанность в поведении (сложность в произвольном начале деятельности, безынициативность в быту, проблематичность удержания программы действий, равнодушие к происходящему), тогда как у 12 она не проявлялась.

Группу контроля составили 13 здоровых испытуемых (8 мужчин, 5 женщин) в возрасте $24,5 \pm 5$ лет. У всех испытуемых, согласно опроснику Аннетт, ведущей была правая рука.

Были проанализированы фМРТ-ответы при выполнении реального движения (сжатие в кулак – разжимание пальцев правой руки) и его мысленном представлении.

ФМРТ-исследования проводили на МР-томографе GE Healthcare (США) с напряженностью магнитного поля 3Т, по единому стандартизированному протоколу получения и анализа данных [9]. Использовалась блоковая парадигма эксперимента: чередование периодов покоя и выполнения двигательной пробы длительностью по 30 с – все при закрытых глазах. Усреднялись результаты пятикратного проведения каждой пробы. Данные фМРТ обрабатывались с помощью программы SPM 8 в среде Matlab 7.0. Коррекция артефактов движения выполнялась по стандарту *generalized linear model (GLM)*.

В каждом исследовании оценивали статистически (по критерию Стьюдента) увеличение локального кровенаполнения мозговой ткани (+BOLD-эффект) в коре и подкорковых образованиях при выполнении двигательного теста по сравнению с фоном. Для определения пространственного нахождения активированных зон (MNI координаты) и их объема (Vox) использовался программный пакет AAL (Automated Anatomical Labeling).

Были проанализированы индивидуальные (в норме и патологии) и групповые (в норме) изменения гемодинамики при двигательных тестах. Учитывались результаты обработки фМРТ на уровне достоверности $p < 0,001$: с поправкой на множественность сравнений FWE в индивидуальных ответах, без этой поправки – в групповых. В группе нормы активацию отдельных моз-

говых структур при реальном и воображаемом движении сопоставляли с помощью парного t-теста (*paired t-test*).

Проводили сравнительную оценку топографии фМРТ-ответов при реальном и воображаемом движении у здоровых людей и пациентов с наличием и отсутствием аспонтанности (АСП) поведения.

Исследования были выполнены в соответствии с принципами Хельсинкской декларации, после получения информированного согласия и одобрения этическим комитетом ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии», а также ИВНД и НФ РАН.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 приводятся усредненные данные группового анализа двигательных фМРТ-ответов – реальных и воображаемых, выполненного у *здоровых испытуемых*. Эти данные были использованы в качестве эталонных для исследований при патологии.

Было установлено, что в норме *при сжатии пальцев в кулак* правой руки к числу характерных зон активации относятся: сенсомоторная кора левого полушария (области пре- и постцентральной извилин контралатерального по отношению к работающей руке полушария) – основной корковый ответ; дополнительная моторная кора (медиальные отделы верхней лобной извилины), ответственная за подготовку действия и расположенная, а также правое (ипсилатеральное движению) полушарие мозжечка (рис 1, 2). В табл. 1 эти активированные структуры представлены в формализованном виде.

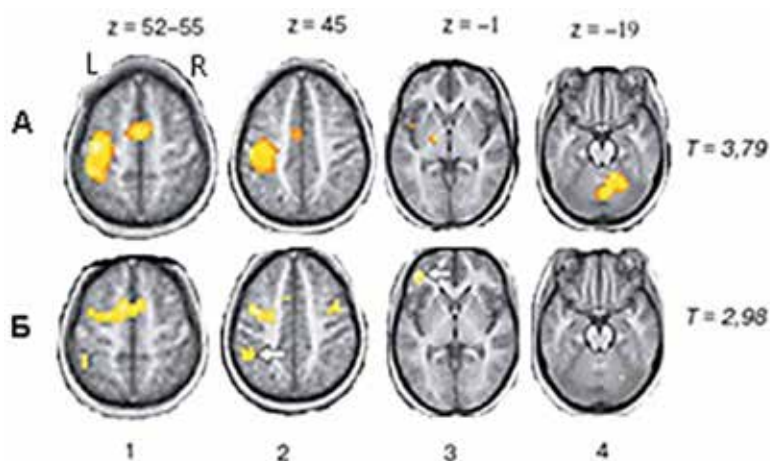


Рис. 1. Усредненные по группе здоровых испытуемых данные функциональной магнитно-резонансной томографии при реальном и воображаемом движении правой рукой ($n = 13$, $p < 0,001$):

А – реальное движение; Б – воображаемое движение.

1–4 – идентичные для двух проб срезы объемного изображения мозга.

Над рисунком – Z-координаты доминирующих на срезах зон активации (в мм).

Желтый цвет – зоны активации при нагрузке по сравнению с фоном

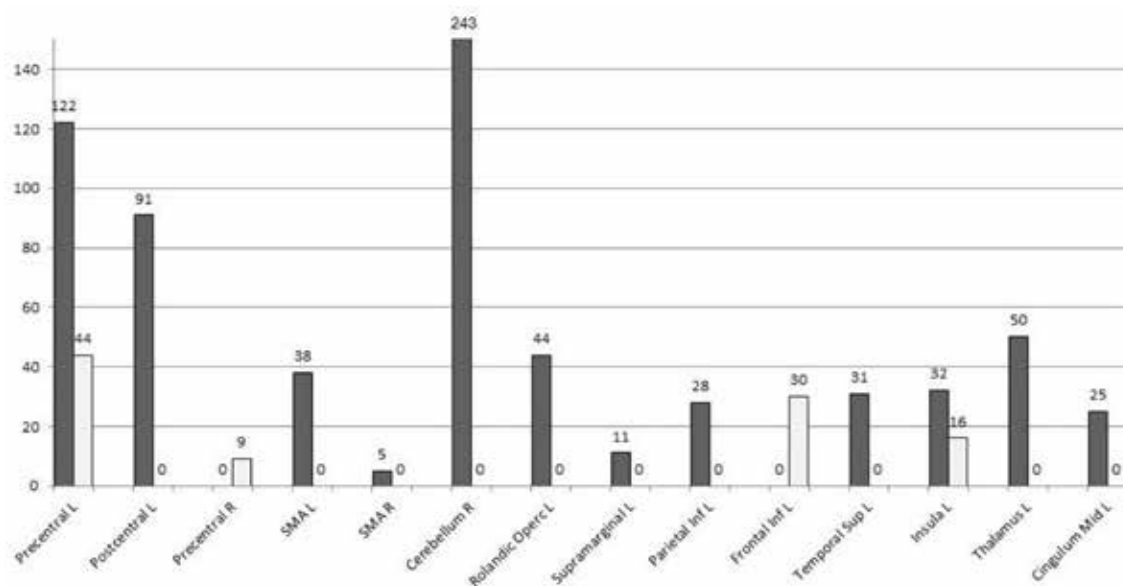


Рис. 2. Отличия объема фМРТ-активации разных структур мозга при реальных и воображаемых движениях правой рукой по результатам парного t -теста ($n = 13$, $p < 0,001$, $T = 3,79$). По оси ординат – объем активации Vox. Темные столбики: представление меньше движения. Светлые столбики: представление больше движения

Анализ фМРТ-ответов при мысленном представлении выполнения движения здоровыми людьми показал выраженную индивидуальную вариативность активации разных отделов мозга. Это может быть объяснено различиями как стратегии реализации данного теста, так и тренированности испытуемых.

Сравнительная оценка групповых фМРТ-ответов (с использованием парного t -теста) выявила 1) значительно меньшую интенсивность активации при воображаемом движении по сравнению с реальным; 2) неидентичность топографии ответов с появлением при воображаемом движении дополнительных зон активации в теменной и лобной коре (на рис. 1 отмечено стрелками), а также в левой островковой зоне; 3) практическое отсутствие при воображаемом движении ответов в мозжечке. Таким образом, изменяется как соотношение активируемых структур, так и их топография при воображаемом движении по сравнению с реальным: ослабление фМРТ-ответов, наиболее резко выраженное в мозжечке и сенсомоторной области, наряду с вовлечением областей правого (ипсилатерального движению) полушария и лобных долей.

Выявленное усиление участия в фМРТ-ответе при воображении движения лобных и теменных отделов полушарий согласуется с топографией ЭЭГ-маркеров произвольного компонента движения [5] и может отра-

жать преобладание активации компонентов сети управляющих функций при представлении движения по сравнению с реальным его выполнением.

В группе с ЧМТ при выполнении реального движения правой рукой у всех пациентов отмечалось сходство топографии фМРТ-ответа с нормой (рис. 3–5 I). В демонстрируемых наблюдениях с ЧМТ показана активация таких структур, как левая пре- и постцентральная извилины, дополнительная моторная кора и правая гемисфера мозжечка, а также ряд других областей, характерная для здоровых испытуемых (табл. 1). Наибольшей вариативностью при патологии характеризуется вовлеченность нижней лобной извилины, нетипичная для двигательного ответа в норме.

ФМРТ-ответы при воображаемом движении правой руки у пациентов с ЧМТ отличались большей индивидуальной вариативностью по сравнению со здоровыми людьми: от полного отсутствия активации до идентичности изменений гемодинамики при реальном и воображаемом двигательных тестах. К числу объяснений этого факта можно отнести различия индивидуальных стратегий: вероятное игнорирование инструкции либо выполнение реального движения на просьбу его представления. Указанная вариативность подтверждала обоснованность индивидуализированного подхода к анализу «воображаемых» фМРТ-ответов.

Таблица 1

Представленность активированных структур при реальном движении правой руки у здоровых испытуемых и пациентов с черепно-мозговой травмой по данным функциональной магнитно-резонансной томографии

	Precentral L	Postcentral L	Precentral R	SMA L	SMA R	Cerebellum R	Rolandic Operc L	Supramarginal L	Parietal Inf L	Frontal Inf L	Temporal Sup L	Insula L	Thalamus L	Cingulum Mid L
Норма (n = 13)	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+
Пац. Ф-ров	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+
Пац. Ф-ев	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+
Пац. Б.	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+
Пац. О-в	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+

По горизонтали – наименование структур. В ячейках: (+) – активация выражена, (-) – активация отсутствует. По вертикали – наблюдения; жирным шрифтом – пациенты с аспонтанностью поведения.

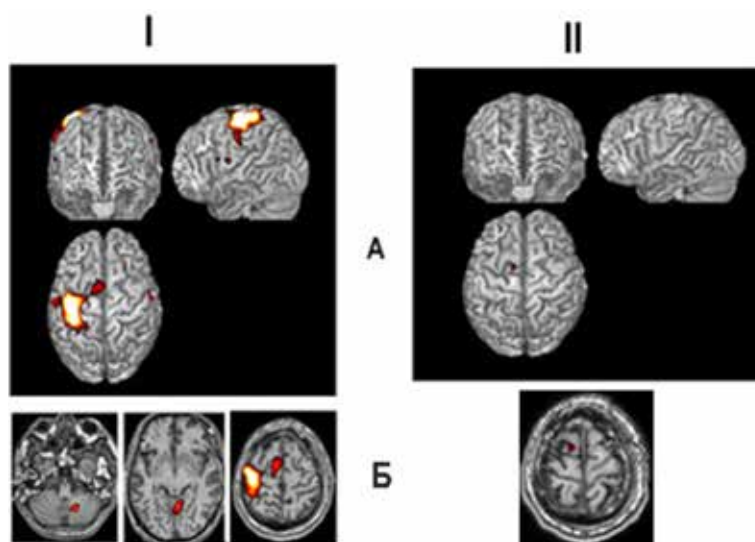


Рис. 3. Данные функциональной магнитно-резонансной томографии при двигательных тестах пациента Б. с аспонтанностью поведения после черепно-мозговой травмы.

I – реальное сжатие пальцев правой руки в кулак. II – воображаемое движение.

A – активация в объемном изображении больших полушарий мозга.

Б – активация на аксиальных срезах объемного изображения мозга. p (FWE-corr) < 0,01.

Желтый и красный цвет – зоны активации при нагрузке по сравнению с фоном

В случаях выраженности «воображаемого» фМРТ-ответа в патологии характерным для него являлось: резкое ослабление уровня активации по сравнению с реальным движением, а также присущее норме наличие гемодинамических сигналов в дополнительной моторной коре при практическом отсутствии активации мозжечка (рис. 3–5, табл. 2). Хотя вариативность «воображаемых» фМРТ-ответов затрудняла их систематизацию, отмечен ряд специфиче-

ских особенностей у пациентов с наличием и отсутствием АСП.

У пациентов с аспонтанностью поведения, выявляемой в период наблюдения от одной недели до двух месяцев после ЧМТ, «воображаемый» фМРТ-ответ ограничивался лишь дополнительной моторной корой (рис. 3 II), либо сочетался с небольшим объемом изменениями в правой прецентральной и теменной (рис. 4, табл. 2) и/или лобной области (2 наблюдения). ЧМТ

пациентов с АПС характеризовалась наличием локальных повреждений разного типа в правой гемисфере: в теменно-затылочной, височной, лобно-височной областях, а также в проекции бедра внутренней капсулы.

Пациенты без аспонтанности поведения были обследованы в период от 2 недель до 11 месяцев после ЧМТ. Поражение мозга у этих пострадавших носило вариативный и диффузный характер: ДАП, множественные двухсторонние корково-подкорковые контузионные или геморрагические очаги, субарахноидальное кровоизлияние. На этом фоне более локальное повреждение у двух пациентов выявлялось в височной и затылочной областях левого полушария, еще у двух (обследованных через 3 и 8 месяцев после травмы) в остром периоде оно обнаруживалось в правой гемисфере.

В «воображаемых» фМРТ-ответах пациентов без АСП, на фоне также значительного разнообразия изменений, отмечена активация, наряду с дополнительной моторной корой, правой прецентральной (рис. 5 I) и теменной (рис. 5 II) областей, также зон левого полушария: прецентральной, теменной и височной зоны Брока (рис. 5, табл. 2). В одном наблюдении была выявлена, кроме того, двухсторонняя активация гиппокампа.

В литературе к числу распространенных относится представление о том, что структурное обеспечение воображаемого движения аналогично реально выполняемому движению [8, 10, 11]. Однако накопление

экспериментальных данных приводит к представлению о том, что в теоретическом плане нейрофизиология воображаемого движения исследована недостаточно [12].

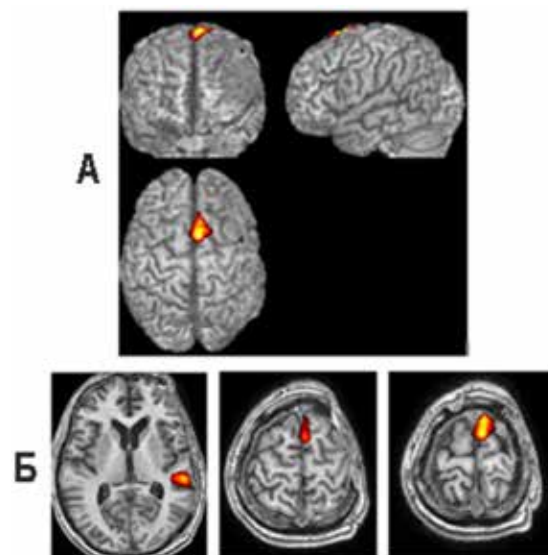


Рис. 4. Данные функциональной магнитно-резонансной томографии при двигательных тестах пациента О-ва с аспонтанностью поведения после черепно-мозговой травмы. А – активация в объемном изображении мозга. Б – активация на аксиальных срезах. p (FWE-corr) < 0,01. Желтый и красный цвет – зоны активации при нагрузке по сравнению с фоном

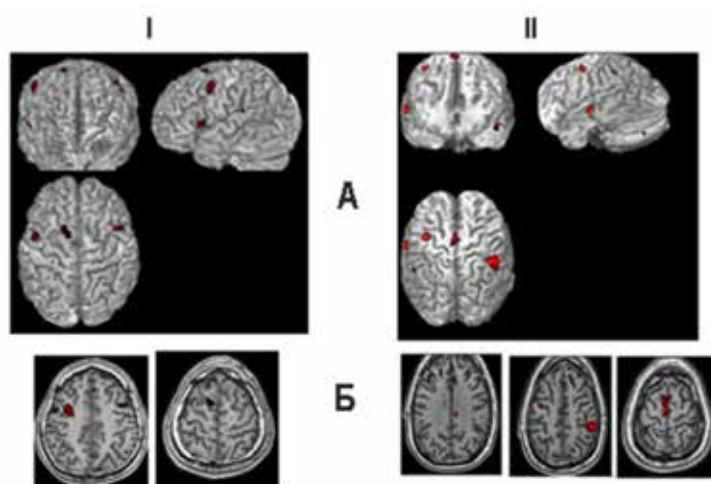


Рис. 5. Примеры функциональной магнитно-резонансной томографии при воображаемом движении правой руки у пациентов с ЧМТ без признаков аспонтанности поведения. I – пациент Ф-ров через 1 месяц после травмы, II – пациент Ф-ев через 2 месяца после травмы. А – активация в объемном изображении мозга. Б – активация на аксиальных срезах. p (FWE-corr) < 0,01. Красный цвет – зоны активации при нагрузке по сравнению с фоном

Таблица 2

Представленность активированных структур при воображаемом движении правой руки у здоровых испытуемых и пациентов с черепно-мозговой травмой по данным функциональной магнитно-резонансной томографии

	Precentral L	Postcentral L	Precentral R	SMA L	SMA R	Cerebellum R	Rolandic Operc L	Supramarginal L	Parietal Inf L	Frontal Inf L	Temporal Sup L	Insula L	Parietal Inf R	Cingulum Mid L
Норма (n = 13)	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	-	+	-	-
Пац. Ф-ров	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+
Пац. Ф-ев	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-	+	-
Пац. Б.	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Пац. О-в	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-

По горизонтали – наименование структур (согласно верификации по атласу AAL).

В ячейках: (+) – активация выражена, (-) – активация отсутствует. По вертикали – наблюдения; жирным шрифтом – пациенты с аспонтанностью поведения.

Продемонстрированная в настоящей работе неидентичность функциональной нейроанатомии реального и воображаемого движений в норме и при церебральной патологии подтверждается также данными фМРТ-ЭЭГ и ЭЭГ-исследований [9, 13]. Отличительными особенностями нейроанатомии воображаемого движения нормы являются меньшая сфокусированность ответа, двухсторонняя активация премоторной коры, вовлечение теменных отделов полушарий, а также левой лобной доли. Данные когерентного анализа ЭЭГ свидетельствуют об участии в обеспечении воображаемого движения здорового человека правого полушария – независимо от представления движения правой или левой руки [9]. Указанный факт может быть обусловлен преимущественной значимостью правой гемисферы в организации пространственно-образной деятельности, саморегуляции [14] и ощущении владения телом [15].

В нашем исследовании показано, что у пациентов с ЧМТ без аспонтанности поведения основные черты нейроанатомии «воображаемого» фМРТ-ответа, хотя и ослабленного, обедненного по составу по сравнению с нормой, сходны со здоровыми испытуемыми: активация разных отделов правой гемисферы, а также периприцентральной коры обоих полушарий. Характерной для пациентов с АСП является ограниченность «воображаемого» фМРТ-ответа либо дополнительной моторной корой, либо в сочетании с активацией прецентральной или теменной коры только

правого полушария. Сопоставляя полученные данные с литературными [3, 5], можно полагать, что способность к согласованной деятельности лобных, прецентральных и теменных областей обоих полушарий является функциональной основой спонтанного поведения.

Заключение

К числу фМРТ-маркеров аспонтанности поведения у пациентов с ЧМТ можно отнести ограниченность «воображаемого» гемодинамического ответа дополнительной моторной корой либо в сочетании с активацией отдельных регионов правого полушария – при ареактивности левой гемисферы. Способность к согласованной деятельности лобных, прецентральных и теменных областей обоих полушарий является функциональной основой программируемого, целенаправленного (спонтанного) поведения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-29-01002 мк.

Список литературы

- Орехова Н.В. Спонтанность как психологическое понятие // Сибирский психологический журнал. 2014. № 51. С. 7–19.
- Зейгарник Б.В. Основы патопсихологии. 3-е изд. М.: Юрайт, 2017. С. 141–153.
- Хомская Е.Д. Нейропсихология. 4-е изд. СПб.: Питер, 2005. 496 с.
- Визель Т.Г. Основы нейропсихологии: учебник для студентов вузов. М.: АСТАстрель, 2005. 384 с.
- Шарова Е.В., Болдырева Г.Н., Жаворонкова Л.А., Ярец М.Ю., Каверина М.Ю., Трошина Е.М., Кроткова О.А. Поиск ЭЭГ-маркеров произвольного компонента двигатель-

ной активности человека // Современные проблемы науки и образования. 2020. № 3. URL: <https://science-education.ru/article/view?id=29818> (дата обращения: 26.02.2022). DOI: 10.17513/spno.29818.

6. Котов С.В., Турбина Л.Г., Бирюкова Е.В., Фролов А.А., Кондур А.А., Зайцева Е.В., Бобров П.Д. Реабилитационный потенциал постинсультных больных, обучающихся кинестетическому воображению движения – двигательный и когнитивный аспекты // Физиология человека. 2017. Т. 43. № 5. С. 52–62. DOI:10.7868/S0131164617050095.

7. Caligiore D., Mustile M., Spalletta G., Baldassarre G. Action observation and motor imagery for rehabilitation in Parkinson's disease: A systematic review and an integrative hypothesis. // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2017. Vol. 72. P. 210–222. DOI:10.1016/j.neubiorev.2016.11.005.

8. Столбков Ю.К., Мошонкина Т.Р., Орлов И.В., Томиловская Е.С., Козловская И.Б., Герасименко Ю.П. Нейрофизиологические корреляты реальной и воображаемой локомоции // Физиология человека. 2019. Т. 45. № 1. С. 119–130. DOI: 10.1134/S0131164619010156.

9. Болдырева Г.Н., Шарова Е.В., Жаворонкова Л.А., Челябинина М.В., Дубровская Л.П., Симонова О.А., Фадеева Л.Н., Пронин И.Н., Корниенко В.Н. Структурно-функциональные особенности работы мозга при выполнении и представлении двигательных нагрузок у здоровых людей (ЭЭГ и фМРТ исследования) // ЖВНД им. И.П. Павлова. 2013. Т. 63. № 3. С. 316–327.

10. Jeannerod M. Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *Neuroimage*. 2001. Vol. 14. No. 1. P. S103.

11. Frolov A.A., Husek D., Bobrov P.D., Mokienko O.A., Chernikova L.A., Kononov R.N. Localization of brain electrical activity sources and hemodynamic activity foci during motor imagery. *Human Physiology*. 2014. Vol. 40. No. 3. P. 273–283. DOI: 10.1134/S0362119714030062.

12. Glover S., Baran M. The Motor-Cognitive Model of Motor Imagery: Evidence From Timing Errors in Simulated Reaching and Grasping. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 2017. Vol. 43. No. 7. P. 1359.

13. Котов С.В., Турбина Л.Г., Бирюкова Е.В., Фролов А.А., Кондур А.А., Зайцева Е.В., Бобров П.Д. Электрофизиологическая активность мозга при управлении интерфейсом мозг – компьютер, основанном на воображении движения // Физиология человека. 2017. Т. 43. № 5. С. 17–28. DOI:10.7868/S0131164617050095.

14. Velichkovskiy B.M., Krotkova O.A., Kotov A.A., Orlov V.A., Verkhlyutov V.M., Ushakov V.L., Sharaev M.G. Consciousness in a multilevel architecture: Evidence from the right side of the brain. *Consciousness and cognition*. 2018. Vol. 64. P. 227–239. DOI: 10.1016/j.concog.2018.06.004.

15. Lopez C., Halje P., Blanke O. Body ownership and embodiment: Vestibular and multisensory mechanisms. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*. 2008. No. 38. P. 149–161. DOI: 10.1016/j.neucli.2007.12.006.