

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ КОННЕКТИВНОСТИ СОСТОЯНИЯ ПОКОЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДВИГАТЕЛЬНОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОСЛЕ ТЯЖЕЛОЙ ЧЕРЕПНО-МОЗГОВОЙ ТРАВМЫ

Марина Викторовна Штерн¹, Владимир Терентьевич Долгих^{2✉},
Артем Николаевич Кузовлев³, Елена Васильевна Шарова⁴

^{1,2,3,4}Федеральный научно-клинический центр реаниматологии и реабилитологии, Москва, Россия

^{1,4}Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук, Москва, Россия

¹mstem@fnkcr.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1345-5237>

²prof_dolgih@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-9034-4912>

³artem_kuzovlev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5930-0118>

⁴esharova@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4994-4187>

Аннотация. Цель – проанализировать особенности структуры функциональной связности двигательной системы по данным функциональной магнитно-резонансной томографии у пациентов после черепно-мозговой травмы. **Материалы и методы.** В исследование включены 53 человека (40 пациентов, перенесших черепно-мозговую травму, и 13 человек – группа нормы). Проведено комплексное клиническое исследование, включавшее оценку неврологического статуса пациентов, функциональное магнитно-резонансное исследование с последующим анализом функциональной связности. Продолжительность записи пациента в положении лежа с закрытыми глазами в расслабленном состоянии составляла 10 минут 12 секунд. Для анализа связности между зонами интереса создавали «маски» с использованием пакета WFU Pick Atlas программы CONN, описывающие взаимодействие областей мозга и их зависимость от экспериментальных условий (покой или деятельность) и поведения. **Результаты.** Показано, что нейропластические перестройки у пациентов включают корковое и подкорковое звено двигательной функциональной системы. Показатели функциональной связности являются наиболее высокими в норме, при легком гемипарезе и прогрессивно уменьшаются по мере нарастания моторного дефицита. Особенности функциональной связности функциональной магнитно-резонансной томографии между симметричными областями подкорковой сети (скорлупа, бледный шар, хвостатое ядро) определяют регуляцию произвольного положения покоя. Установлено, что важными факторами нейропластичности двигательной системы головного мозга у пациентов, перенесших тяжелую черепно-мозговую травму, являются качественные нелинейные изменения сетевых паттернов связности.

Ключевые слова: черепно-мозговая травма, двигательные нарушения, нейропластичность двигательной системы

Шифр специальности: 3.3.3 Патологическая физиология.

Для цитирования: Штерн М. В., Долгих В. Т., Кузовлев А. Н., Шарова Е. В. Информативность показателей функциональной связности состояния покоя для оценки двигательной функциональной системы после тяжелой черепно-мозговой травмы // Вестник СурГУ. Медицина. 2022. № 4 (54). С. 61–68. DOI 10.34822/2304-9448-2022-4-61-68.

ВВЕДЕНИЕ

Черепно-мозговая травма (ЧМТ) является одной из особо значимых причин инвалидизации как в России [1], так и за рубежом [2–4] вне зависимости от пола и возраста, социального и экономического статуса [5–6]. Несмотря на успехи нейрореаниматологии и новые лечебные стратегии [7], негативные последствия ЧМТ остаются актуальной проблемой. У 75 % пациентов с диагнозом тяжелая ЧМТ выявляются различные функциональные нарушения, включая двигательные, и дефицитная неврологическая симптоматика в виде нарушения движений (парезы конечностей), мышечно-

го тонуса, координации, речи, дисфункции черепных нервов, изменений чувствительности, сухожильных и кожных рефлексов. Двигательный дефицит является одним из наиболее значимых и ведущих факторов инвалидизации организма [1]. Диагностика функционального состояния этой системы может уточнить патогенетические аспекты патологических процессов, происходящих в мозге человека, в том числе в рамках такого сложного процесса, как травматическая болезнь мозга. Таким образом, изучение функциональной двигательной системы является важным направлением как

для уточнения имеющихся данных о ее структуре, так и для выявления патофизиологических механизмов перестроек этой системы при двигательных нарушениях.

Цель – проанализировать особенности структуры функциональной коннективности двигательной системы по данным функциональной магнитно-резонансной томографии у пациентов после черепно-мозговой травмы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследование включены 53 человека: 40 пациентов в возрасте от 18 до 35 лет, перенесших ЧМТ, и 13 человека группы нормы в возрасте от 18 до 27 лет. Проведено комплексное клиническое и функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) исследование. Клиническая оценка включала в себя комплексный неврологический осмотр. Нарушение движений оценивали по пятибалльной шкале оценки мышечной силы, уровень сознания – по шкале комы Глазго (ШКГ) и шкале восстановления после комы CRS-R (Coma Recovery Scale – Revised). Деление на группы пациентов (с легким и тяжелым гемипарезом) осуществляли на основе выраженности двигательных

нарушений. Всем пациентам была проведена структурная МРТ. У большинства пациентов (81 %) тяжелая ЧМТ была получена вследствие дорожно-транспортных происшествий. Характер повреждений статистически значимых повреждений подкорковых образований не выявил. Отмечалось повреждение коры лобных долей (90 % слева и 95 % справа), теменных долей (45 % слева и 60 % справа), височных долей (75 % слева и 67 % справа), затылочных долей (20 % слева и 25 % справа), подкорковых структур (25 % слева и 30 % справа). Повреждения отмечались: мозолистого тела – в 50 % случаев, ножек мозга справа – в 50 %, слева – в 10 %, моста – в 30 %, ствола – в 25 %, таламусов слева – в 5 %, справа не было, подкорково-базальных отделов – в 15 %, ДАП – в 55 % случаев. Статистически значимыми были повреждения лобных и теменных областей. МРТ выполняли на томографах «Magnetom 42 SP» 3,0 ТЛ в режиме T1 и T2. Продолжительность записи фМРТ составляла 10 минут 12 сек в положении пациента лежа, расслабленно, с закрытыми глазами. Характеристики структурных изображений: TR = 8,8 мс, TE = 3,5 мс, толщина среза = 1 мм, FOV = 250 мм, матрица изображения 256 × 256, размер вокселя 0,97 × 0,97 × 1,0 мм.

Original article

THE VALUE OF RESTING STATE FUNCTIONAL CONNECTIVITY INDICATORS IN ASSESSMENT OF MOTOR FUNCTIONAL SYSTEM AFTER SEVERE TRAUMATIC BRAIN INJURY

Marina V. Shtern¹, Vladimir T. Dolgikh², Artem N. Kuzovlev³, Elena V. Sharova⁴

^{1, 2, 3, 4}Federal Scientific and Clinical Center of Resuscitation and Rehabilitation, Moscow, Russia

^{1, 4}Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹mstern@fnkcr.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1345-5237>

²prof_dolgih@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9034-4912>

³artem_kuzovlev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5930-0118>

⁴esharova@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4994-4187>

Abstract. The study aims to analyze the features of the functional connectivity structure of the motor system in patients after traumatic brain injury according to functional magnetic resonance imaging. **Materials and methods.** The study included 53 people: 40 patients with traumatic brain injury and 13 healthy people. A comprehensive clinical study was carried out, including an assessment of the patients' neurological state and a functional magnetic resonance imaging study followed by an analysis of functional connectivity. At rest and with their eyes closed, patients underwent functional magnetic resonance imaging for 10 minutes and 12 seconds. Masks, which described the brain areas interactions, their dependence on the experimental conditions (at rest or active) and on behavior, were generated in CONN using the WFU Pick Atlas package to analyze the regions of interest connectivity. **Results.** The study shows that neuroplastic changes in patients include the cortical and subcortical parts of the motor functional system. The highest indicators of functional connectivity are found in the norm and mild hemiparesis. With an increase in the motor deficit, the indicators progressively decrease. The regulation of an arbitrary resting position is determined by functional connectivity of functional magnetic resonance imaging between symmetrical areas of the subcortical network (shell, globus pallidus, caudate nucleus). The study found that the most important factors in the neuroplasticity of the cerebral motor system in patients with severe traumatic brain injury are qualitative nonlinear changes in the network patterns of connectivity.

Keywords: traumatic brain injury, movement disorders, motor system neuroplasticity

Code: 3.3.3. Pathophysiology.

For citation: Shtern M. V., Dolgikh V. T., Kuzovlev A. N., Sharova E. V. The Value of Resting State Functional Connectivity Indicators in Assessment of Motor Functional System after Severe Traumatic Brain Injury // Vestnik SurGU. Medicine. 2022. No. 4 (54). P. 61–68. DOI 10.34822/2304-9448-2022-4-61-68.

Характеристики фМРТ: TR = 2 000 мс, TE = 30 мс, толщина среза = 3 мм, FOV = 250 мм, матрица изображения 128 × 128, размер воксела 1,95 × 1,95 × 3 мм. При каждом исследовании было получено по 300 наборов функциональных объемов. Общее число срезов в функциональной серии составляло 7000–12000. Соотношение сигнал/шум 1,0.

Статистическую обработку данных фМРТ (+BOLD-ответ) проводили по единому протоколу с помощью пакета SPM 12 в программной среде Matlab2019b. Предобработка данных включала корректировку срезов по времени, оценку двигательных артефактов.

Построение коннективностей и статистический анализ осуществляли между зонами интереса (ROI). Все полученные и сохраненные «зоны интереса» в формате NIFTI переносили на системный диск MATLAB\toolbox\SPM\toolbox\CONN\rois. Построение функциональных связей осуществляли в программе CONN (Connectivity Toolbox) на базе MATLAB. Данная программа позволяет строить графовые, 3d- и 2d-модели коннективности головного мозга, а также оценивать силу, полярность и значимость связей. Расчет коннективности между каждой парой «зон интереса» проводился с помощью анализа Пирсона и последующим применением двумерного преобразования Фишера. Межгрупповая статистика включала критерий Стьюдента ($p < 0,05$) с поправкой на множественность сравнений.

На основании литературных данных, учитывая многогранность и мультинаправленность взаимоотношений подкорковых структур, а также плотность расположения этих образований, была спроектирована «маска», объединившая: скорлупу, хвостатое ядро, бледный шар, прецентральную извилину, миндалу, нижнюю лобную извилину, дополнительную мотор-

ную кору и мозжечок, таламус, гиппокамп. Коннективность маски оценивали в норме и патологии по данным фМРТ-покоя.

На рис. 1 представлена локализация ROI, коннективность между исследуемыми подкорковыми структурами головного мозга, с учетом данных литературы о подкорковом обеспечении произвольного движения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первым этапом исследования было изучение показателей коннективности двигательной функциональной системы у здоровых испытуемых ($n = 13$). Полученные данные использовали для сравнения и анализа изменений этой системы при наличии двигательного дефицита, а также представляют интерес как самостоятельные (рис. 2).

Максимальное количество связанностей было характерно для состояния покоя. Связанность всех парных структур может свидетельствовать о сохранности ассоциативных волокон, с помощью которых осуществляется синхронизация процесса покоя. Наиболее интересны тормозные связанности между подкорковыми структурами и мозжечком, отражающие процесс расслабленного положения покоя. Обращают на себя внимание взаимоотношения «бледный шар – скорлупа – хвостатое ядро», которые являются «латерализованными» – они более достоверны слева. Данный факт может отражать функциональную асимметрию этих систем в структурах, влияющих на тонус мускулатуры и движение.

В табл. 1 представлены пары, которые отражают активность подкорковых структур. Видно, что именно связи стриопаллидарной (между бледным шаром, скорлупой и хвостатым ядром) системы являются наиболее достоверными.

Таблица 1

Области изменения функциональной коннективности у здоровых испытуемых

Зоны анализа	T-value	P-unc
Хвостатое ядро слева – бледный шар слева	5,26	0,0012
Хвостатое ядро справа – бледный шар справа	3,85	0,0063
Хвостатое ядро слева – перегородка слева	5,64	0,0015
Хвостатое ядро справа – перегородка справа	6,63	0,0003
Миндалины слева – скорлупа слева	4,51	0,0028
Миндалины справа – скорлупа справа	4,47	0,0029
Хвостатое ядро справа – скорлупа слева	6,71	0,0003
Миндалины справа – скорлупа слева	4,59	0,0025

Примечание: T-value – критическая точка распределения Стьюдента, показатель достоверности статистической гипотезы, рекомендуемый к использованию при выборках менее 30 человек с неизвестным стандартным отклонением популяции.

Полученные данные отражают положительные функциональные взаимодействия между хвостатым ядром, скорлупой, между бледным шаром и хвостатым ядром, между моторной и дополнительной моторной корой, и отрицательные – для мозжечка. Высокая достоверность связанности этих областей служит про-

явлением напряжения стриопаллидарной системы в процессе сохранения состояния покоя и нахождения в определенной позе, в том числе расслабленной.

Исследование состояния покоя при правостороннем гемипарезе показало, что у пациентов с ЧМТ без пареза уменьшалось количество статистически



Рис. 1. «Маска» для оценки фМРТ-коннективности в системе подкоркового обеспечения произвольного движения.
 «Зоны интереса» согласно координатам атласа AAL: 1 – миндалины слева; 2 – миндалины справа; 3 – хвостатое ядро слева; 4 – хвостатое ядро справа; 5 – полушарие мозжечка слева; 6 – полушарие мозжечка справа; 7 – нижняя лобная извилина слева; 8 – нижняя лобная извилина справа; 9 – гиппокамп слева; 10 – гиппокамп справа; 11 – бледный шар слева; 12 – бледный шар справа; 13 – прецентральная извилина слева; 14 – прецентральная извилина справа; 15 – перегородка слева; 16 – перегородка справа; 17 – дополнительная моторная кора справа; 18 – дополнительная моторная кора слева; 19 – таламус слева; 20 – таламус справа

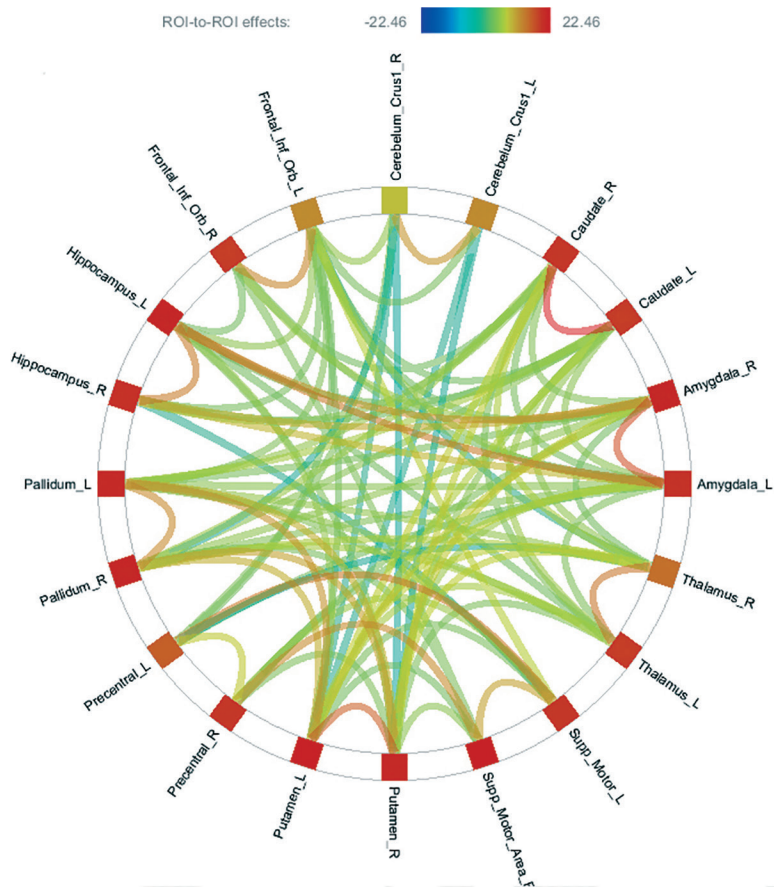


Рис. 2. Функциональные связи подкоркового и корково-подкоркового звеньев двигательной функциональной системы в состоянии покоя по данным фМРТ-покоя ($n = 13$)

значимых связанностей, преимущественно тормозного характера (мозжечково-подкорковые), но в целом архитектура связанностей сохранялась. У пациентов с гемипарезом в 4 балла картина полной сети разительно отличалась: отмечалось значительное уменьшение статистически значимых связанностей с сохранением на уровне статической значимости связей между симметричными отделами дополнительной моторной коры, связанностей левого гиппокампа и миндалина и структур стриопаллидарной системы (рис. 3).

При сравнении с нормой у пациентов без пареза большинство связанностей было статистически значимо меньше нормы, а в группе с легким гемипарезом в 4 балла часть связанностей гиппокампа и моторной коры была меньше нормы и было

усиление большинства подкорковых связанностей. При сравнении связанностей между группами пациентов с ЧМТ без гемипареза и с легким гемипарезом статистически значимыми были таламо-каудальные связи, которые оказались более усиленными, у пациентов с гемипарезом, а остальные были статистически значимо меньше (рис. 4).

Отличия от нормы были не только качественными, но и количественными. При сравнении с нормой определялось значение T-value в заданной области за счет вычисления отличности от нормы. Значимость левосторонних подкорковых связей хвостатого ядра, скорлупы, бледного шара, а также левого бледного шара с правой миндалиной, левого хвостатого ядра с правым бледным шаром усиливается (табл. 2).

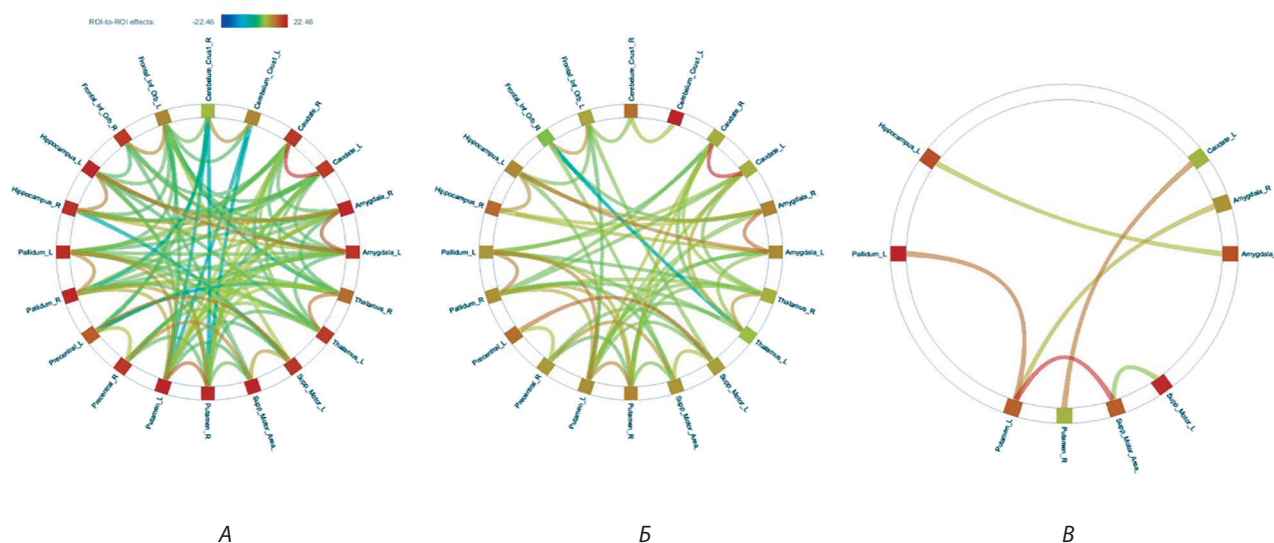


Рис. 3. Функциональные связи подкоркового и корково-подкоркового звеньев двигательной функциональной системы в состоянии покоя по данным: А – фМРТ-покоя в норме ($n = 13$), Б – у пациентов после черепно-мозговой травмы без пареза ($n = 13$), В – у пациентов после черепно-мозговой травмы с правосторонним гемипарезом 4 балла ($n = 18$)

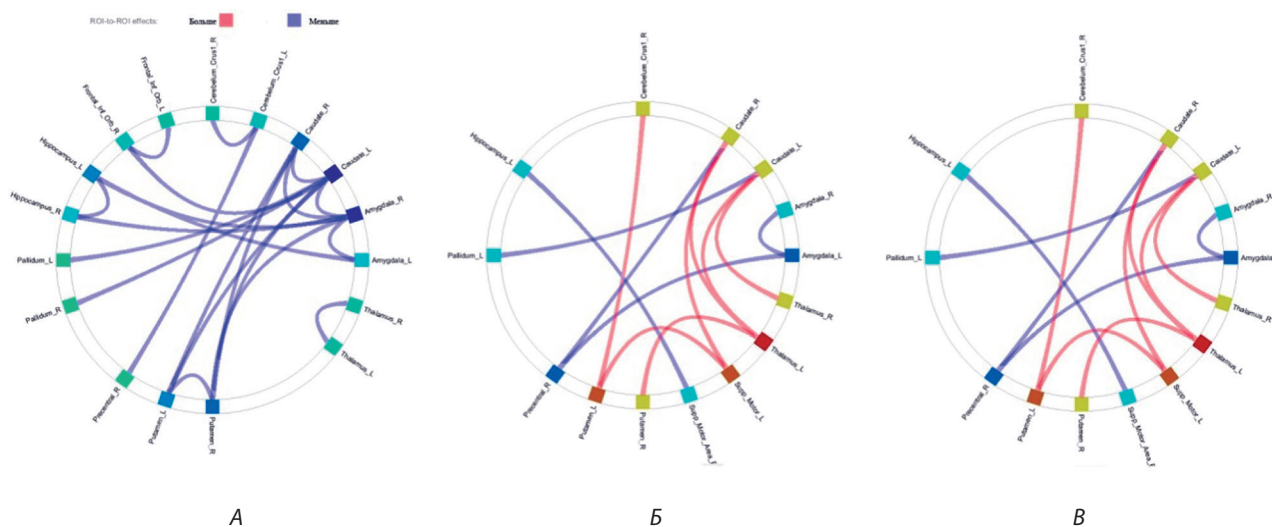


Рис. 4. Функциональные связи подкоркового и корково-подкоркового звеньев двигательной функциональной системы в состоянии покоя по данным: А – при сравнении с нормой группы с черепно-мозговой травмой без гемипареза, Б – при сравнении с нормой группы с черепно-мозговой травмой и гемипарезом в 4 балла ($n = 13$), В – группы пациентов без гемипареза и с гемипарезом в 4 балла между собой

Значения T-value в группе нормы (n = 13), группы пациентов с ТЧМТ (n = 13), пациентов с парезом 4 балла (n = 17)

Состояние покоя правши норма			Состояние покоя после ЧМТ без пареза в сравнении с нормой			Состояние покоя после ЧМТ 4 балла пареза в сравнении с нормой		
Области анализа	T-value	P-unc	Области анализа	T-value	P-unc	Области анализа	T-value	P-unc
Хвостатое ядро справа – хвостатое ядро слева	6,97	0,010	Хвостатое ядро справа – хвостатое ядро слева	18,75	0,003	Хвостатое ядро справа – хвостатое ядро слева	10,35	0,0023
Бледный шар справа – бледный шар слева	10,85	0,006	Бледный шар справа – бледный шар слева	15,32	0,001	Бледный шар справа – бледный шар слева	13,12	0,0015
Скорлупа справа – скорлупа слева	8,64	0,003	Скорлупа справа – скорлупа слева	11,51	0,001	Скорлупа справа – скорлупа слева	19,31	0,0057
Нижняя лобная извилина справа – нижняя лобная извилина слева	7,63	0,0003	Нижняя лобная извилина справа – нижняя лобная извилина слева	8,75	0,005	Нижняя лобная извилина справа – нижняя лобная извилина слева	7,05	0,0021
Таламус справа – таламус слева	16,06	0,0005	Таламус справа – таламус слева	17,25	0,0007	Таламус справа – таламус слева	17,30	0,0055
Скорлупа слева – бледный шар слева	–	–	Скорлупа слева – бледный шар слева	13,46	0,006	Скорлупа слева – бледный шар слева	10,65	0,004
Хвостатое ядро слева – бледный шар справа	14,07	0,0007	Скорлупа слева – бледный шар слева	13,02	0,007	Скорлупа слева – бледный шар слева	11,49	0,005
Бледный шар слева – миндалина справа	–	–	Бледный шар слева – миндалина справа	17,01	0,0027	Бледный шар слева – миндалина справа	15,05	0,002

Примечание: ЧМТ – черепно-мозговая травма; T-value – критическая точка распределения Стьюдента, показатель достоверности статистической гипотезы, рекомендуемый к использованию при выборках менее 30 человек с неизвестным стандартным отклонением популяции.

Особенно интересным с точки зрения аспектов нейропластичности является состояние покоя после ЧМТ без гемипареза. Несмотря на отсутствие выраженного неврологического дефицита, показатели коннективности значимо отличаются от нормы, выражено взаимодействие левополушарных подкорковых структур и лобных областей, что может свидетельствовать об их вкладе в компенсацию спокойного состояния, усиление влияний структур палеостриатума (бледного шара) и напряжении этих структур как раз в процессе компенсации нахождения в спокойном состоянии, а общее уменьшение количества взаимосвязей – о перераспределении компенсаторных усилий на другие более поврежденные функции.

При наличии легкого пареза даже в состоянии покоя отмечали усиление связей между подкорковыми ядрами на стороне двигательного дефицита, что может отражать напряжение системы для обеспечения мышечного тонуса и сохранение покоя в конечности в момент исследования, что является отражением нейропластических перестроек. При анализе групп

пациентов с выраженным (3 балла) и глубоким (2 балла) гемипарезом изменения носили более выраженный характер. При сравнении с нормой значения межполушарной коннективности от нормы не отличались. Однако при этом активность совокупности взаимосвязей между бледным шаром, хвостатым ядром и скорлупой отмечалась во всех исследуемых подгруппах, была больше нормы с двух сторон и имела большие значения справа (табл. 3).

Установлено, что у пациентов с тяжелой ЧМТ в структуре коннективности функциональной двигательной системы в состоянии покоя отмечается уменьшение числа значимых функциональных связей, особенно сопряженных со степенью посттравматического гемипареза. Они выражаются редукцией диагональных межполушарных подкорковых связей бледного шара и скорлупы, межлобных корковых, мозжечково-корковых, а также большинства симметричных и диагональных подкорковых связей при относительной сохранности билатеральных связей таламуса и хвостатого ядра при легком гемипарезе и наличием

Значения T-value в группе нормы (n = 13), группы пациентов с парезом в 3 балла (n = 5), пациентов с парезом в 2–1 балл (n = 4)

Состояние покоя правши норма			Состояние покоя после ЧМТ с парезом в 3 балла в сравнении с нормой			Состояние покоя после ЧМТ в 4 балла пареза в сравнении с нормой		
Области анализа	T-value	P-unc	Области анализа	T-value	P-unc	Области анализа	T-value	P-unc
Хвостатое ядро справа – хвостатое ядро слева	2,94	0,008	Хвостатое ядро справа – хвостатое ядро слева	3,32	0,003	Хвостатое ядро справа – хвостатое ядро слева	2,85	0,002
Бледный шар справа – бледный шар слева	1,47	0,005	Бледный шар справа – бледный шар слева	2,58	0,005	Бледный шар справа – бледный шар слева	1,26	0,005
Скорлупа справа – скорлупа слева	2,23	0,003	Скорлупа справа – скорлупа слева	1,70	0,004	Скорлупа справа – скорлупа слева	1,98	0,005
Таламус справа – таламус слева	4,06	0,0003	Таламус справа – таламус слева	3,05	0,0004	Таламус справа – таламус слева	3,30	0,0057
Скорлупа слева – бледный шар слева	3,35	0,0004	Скорлупа слева – бледный шар слева	4,5	0,008	Скорлупа слева – бледный шар слева	4,45	0,002

Примечание: ЧМТ – черепно-мозговая травма; T-value – критическая точка распределения Стьюдента, показатель достоверности статистической гипотезы, рекомендуемый к использованию при выборках менее 30 человек с неизвестным стандартным отклонением популяции.

единичных межполушарных кортикальных и подкорковых связей, а также ослабленных внутриволушарных подкорковых связей – при грубом гемипарезе. Особенности функциональной коннективности МРТ между симметричными областями подкорковой сети (скорлупа, бледный шар, хвостатое ядро) наряду с достоверной связанностью лобных областей коры определяют регуляцию произвольного положения покоя.

Учитывая современный уровень развития программного обеспечения и методов нейровизуализации, современным и целесообразным является интегральный подход к оценке двигательной системы у пациентов после ЧМТ. Данный подход позволяет всесторонне оценить изменения в двигательной системе и более объективно реабилитационный потенциал, установить патогенез нейропластических перестроек в зависимости от тяжести двигательного дефицита.

Функциональная МРТ относится к числу доступных и современных методов исследования, что обусловлено сочетанием безопасности, неинвазивности, а также высокого пространственного и временного разрешения данной методики [8]. Изучение состояния покоя показывает многообразие разнотипных реакций при одной и той же церебральной патологии, в частности при ЧМТ. Таким образом, полученные нами данные о перестройках двигательной функциональной системы значительно дополняют и расширяют представление о патогенетической значимости нарушения движения при травматической болезни мозга.

Литературные данные по коннективности сетей фМРТ покоя в процессе восстановления двигательных функций после восстановления сознания носят порой противоречивый характер. Так, по данным гра-

фового анализа фМРТ, уровень локальной коннективности (число ребер, связанных с узлом), силы (сумма весов ребер, связанных с узлом) и локальная эффективность сетей (средние расстояния между всеми парами узлов в сети, вычисленные для соседних узлов) увеличены при тяжелой ЧМТ или ЧМТ средней тяжести в течение порядка 4 лет 10 месяцев после травмы. При этом глобальные связи (по показателю функциональной интеграции) ослаблены [9]. По мнению авторов, локальная гиперконнективность, независимо от стадии восстановления, является признаком, отражающим предположительно усиленную активацию мозга в ответ на повреждение нейробиологического субстрата. Сходные изменения наблюдаются также при здоровом старении и при наличии опухолей, что указывает на общую нейропатологию, лежащую в основе этого явления: разрушение белого и серого вещества [9].

С другой стороны, установлено, что ослабление внутрисетевой коннективности при ЧМТ средней тяжести и тяжелой ЧМТ широко представлено в областях мозга, связанных с целенаправленным поведением, в цепях исполнительного контроля, частях сетей пассивного режима работы головного мозга [2]. Наблюдается редукция степени центральности и центральности по посредничеству в задней части поясной коры; дорсальная часть премоторной коры и дорсолатеральная префронтальная кора выступают узловыми точками [2]. Наблюдается уменьшение коэффициентов кластеризации в верхней орбитофронтальной коре, средней лобной извилине и нижней затылочной извилине правого полушария, а также в нижнем фронтальном треугольнике левого полушария; в то же время происходит увеличение коэффициента кластеризации

в правой постцентральной извилине, снижение локальной эффективности в средней лобной извилине левого полушария и аномалии в связях мозжечка с височными долями у пациентов с легкой ЧМТ по сравнению с контролем [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные в исследовании данные показывают, что для изучения патогенеза травматической болезни мозга необходима более широкая методика, чем изучение изолированных сетей покоя. Применение интегрального подхода дает более пол-

ное представление о состоянии всей системы и помогает подробно оценить ее сохранности и пластические возможности. Оценка коннективности в состоянии покоя является современным и перспективным методом для оценки двигательной функциональной системы в целом и важным инструментом изучения нейропластичности после черепно-мозговой травмы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лихтерман Л. Б., Кравчук А. Д., Охлопков В. А. Учение о последствиях черепно-мозговой травмы Часть I. Дефиниции, классификация, клиническая и количественно-томографическая синдромология // Клинич. разбор в общей медицине. 2021. № 5. С. 25–29. DOI 10.47407/kr2021.2.5.00067.
2. D'Souza M. M., Kumar M., Choudhary A. et al. Alterations of Connectivity Patterns in Functional Brain Networks in Patients with Mild Traumatic Brain Injury: A Longitudinal Resting-State Functional Magnetic Resonance Imaging Study // Neuroradiol J. 2020. Vol. 33, Is. 2. P. 186–197. DOI 10.1177/1971400919900275.
3. Chaban V., Clarke G. J. B., Skandsen T. et al. Systemic Inflammation Persists the First Year after Mild Traumatic Brain Injury: Results from the Prospective Trondheim Mild Traumatic Brain Injury Study // J Neurotrauma. 2020. Vol. 37, Is. 19. P. 2120–2130. DOI 10.1089/neu.2020.6990.
4. Zhang J., Safar K., Emami Z. et al. Local and Large-Scale Beta Oscillatory Dysfunction in Males with Mild Traumatic Brain Injury // J Neurophysiol. 2020. Vol. 124, Is. 6. P. 1948–1958.
5. Левин О. С., Чимагомедова А. Ш. Когнитивные нарушения при черепно-мозговой травме // Современ. терапия в психиатрии и неврологии. 2019. № 2. С. 33–43.
6. Кошман И. П., Калинин А. Г. Изолированная тяжелая черепно-мозговая травма: клиническое течение и исходы: ретроспективный анализ // Современ. проблемы науки и образования. 2021. № 1. С. 48. DOI 10.17513/spno.30518.
7. Александрова Е. В., Зайцев О. С., Потопов А. А. Клинические синдромы дисфункции нейромедиаторных систем при тяжелой травме мозга // Журн. неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. 2015. Т. 115, № 7. С. 40–46. DOI 10.17116/jnevro20151157140-46.
8. Яриков А. В., Лобанов И. А., Леонов В. А. и др. Комплексная нейровизуализация черепно-мозговой травмы: магнитно-резонансная томография // Наука и инновации в медицине. 2020. Т. 5, № 4. С. 239–244. DOI 10.35693/2500-1388-2020-5-4-239244.
9. Caeyenberghs K., Verhelst H., Clemente A., Wilson P. H. Mapping the Functional Connectome in Traumatic Brain Injury: What Can Graph Metrics Tell Us? // Neuroimage. 2017. Vol. 160. P. 113–123.
10. Shi J., Teng J., Du X., Li N. Multi-Modal Analysis of Resting-State fMRI Data in mTBI Patients and Association with Neuropsychological Outcomes // Front Neurol. 2021. Vol. 12. P. 639760.

REFERENCES

1. Likhterman L. B., Kravchuk A. D., Okhlopov V. A. Theory about Traumatic Brain Injury Effects. Part I. Definitions, Classification, Clinical Signs and Quantitative Tomography // Klinich. razbor v obshchei meditsine. 2021. No. 5. P. 25–29. DOI 10.47407/kr2021.2.5.00067. (In Russian).
2. D'Souza M. M., Kumar M., Choudhary A. et al. Alterations of Connectivity Patterns in Functional Brain Networks in Patients with Mild Traumatic Brain Injury: A Longitudinal Resting-State Functional Magnetic Resonance Imaging Study // Neuroradiol J. 2020. Vol. 33, Is. 2. P. 186–197. DOI 10.1177/1971400919900275.
3. Chaban V., Clarke G. J. B., Skandsen T. et al. Systemic Inflammation Persists the First Year after Mild Traumatic Brain Injury: Results from the Prospective Trondheim Mild Traumatic Brain Injury Study // J Neurotrauma. 2020. Vol. 37, Is. 19. P. 2120–2130. DOI 10.1089/neu.2020.6990.
4. Zhang J., Safar K., Emami Z. et al. Local and Large-Scale Beta Oscillatory Dysfunction in Males with Mild Traumatic Brain Injury // J Neurophysiol. 2020. Vol. 124, Is. 6. P. 1948–1958.
5. Levin O. S., Chimagomedova A. Sh. Cognitive Impairment in Traumatic Brain Injury // Sovremen. terapii v psikhiiatrii i nevrologii. 2019. No. 2. P. 33–43. (In Russian).
6. Koshman I. P., Kalinichev A. G. Isolated Severe Traumatic Brain Injury: Clinical Course and Outcomes (Retrospective Analysis) // Modern Problems of Science and Education. 2021. No. 1. P. 48. DOI 10.17513/spno.30518. (In Russian).
7. Aleksandrova E. V., Zaitsev O. S., Potapov A. A. Clinical Syndromes of Neurotransmitter System Dysfunction in Severe Brain Injury // S. S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry. 2015. Vol. 115, No. 7. P. 40–46. DOI 10.17116/jnevro20151157140-46. (In Russian).
8. Yarikov A. V., Lobanov I. A., Leonov V. A. et al. Complex Neuroimaging of Traumatic Brain Injury: Magnetic Resonance Imaging // Science and Innovations in Medicine. 2020. Vol. 5, No. 4. P. 239–244. DOI 10.35693/2500-1388-2020-5-4-239244. (In Russian).
9. Caeyenberghs K., Verhelst H., Clemente A., Wilson P. H. Mapping the Functional Connectome in Traumatic Brain Injury: What Can Graph Metrics Tell Us? // Neuroimage. 2017. Vol. 160. P. 113–123.
10. Shi J., Teng J., Du X., Li N. Multi-Modal Analysis of Resting-State fMRI Data in mTBI Patients and Association with Neuropsychological Outcomes // Front Neurol. 2021. Vol. 12. P. 639760.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

М. В. Штерн – кандидат биологических наук.

В. Т. Долгих – доктор медицинских наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник.

А. Н. Кузовлев – доктор медицинских наук, заместитель директора – руководитель.

Е. В. Шарова – доктор биологических наук, главный научный сотрудник.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M. V. Shtern – Candidate of Sciences (Biology).

V. T. Dolgikh – Doctor of Sciences (Medicine), Professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Chief Researcher.

A. N. Kuzovlev – Doctor of Sciences (Medicine), Deputy Director – Executive.

E. V. Sharova – Doctor of Sciences (Biology), Chief Researcher.