

Динамика функциональных сетей головного мозга в ранний восстановительный период ишемического инсульта по данным МРТ

О.В. Зудилина^{1,2}, В.В. Попов^{1,2}, Е.Д. Петровский¹, Ю.А. Станкевич^{1,2}, А.А. Тулупов^{1,2}

¹ Институт «Международный томографический центр» СО РАН
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3а

² Новосибирский государственный университет
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Резюме

Цель исследования – оценить динамику изменений функциональных нейронных сетей головного мозга (default mode network, DMN, и sensorimotor network, SMN) в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта с учетом объема ишемического поражения по данным МРТ. **Материал и методы.** На МР-томографе 3,0 Тл проведено динамическое МРТ-исследование головного мозга 137 пациентов на 1–3-и сутки, 7–10-е сутки, 3–4-й месяц после манифестации острого нарушения мозгового кровообращения по рутинному протоколу (DWI-EPI, FLAIR-SPiR, T2-WI, T1W-TFE), дополненному методикой функциональной МРТ покоя. Дополнительно выполнено тестирование с использованием Монреальской шкалы оценки когнитивных функций (MoCA-тест) и модифицированной шкалы Рэнкина. Выборка составила 36 пациентов с диагнозом острый ишемический инсульт супратенториальной локализации, прошедших исследование не менее двух раз. **Результаты и их обсуждение.** Отмечена тенденция ($p > 0,05$) к увеличению функциональных связей между регионами DMN и SMN от первого к третьему исследованию. Результаты теста MoCA ($p < 0,05$ для второго и третьего исследования по сравнению с 1-м) в динамике показали улучшение когнитивных функций, соответствующие клинической картине. Наиболее значимый результат корреляционного анализа – прямая корреляционная связь между DMN и SMN в первом наблюдении ($R = 0,57$; $p = 0,006$). Выявлено статистически значимое влияние большего объема на динамику восстановления связности между регионами DMN ($R = 0,83$; $p = 0,04$). **Заключение.** Получена сонаправленная динамика внутрисетевой связности DMN и SMN, что свидетельствует о системной функциональной перестройке головного мозга при остром нарушении мозгового кровообращения. В раннем восстановительном периоде в динамике отмечается увеличение связности DMN и SMN по данным функциональной МРТ наряду с восстановлением когнитивных функций по результатам когнитивного теста. Требуется дополнительные исследования с целью поиска закономерностей восстановления DMN и SMN, влияния объема и локализации очага поражения на восстановление функциональной коннективности исследуемых нейронных сетей.

Ключевые слова: ишемический инсульт, функциональная МРТ покоя, функциональная связность, сеть режима по умолчанию, сенсомоторная сеть.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование проведено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания 1023110800234-5-3.2.25;3.1.4;3.2.12 «Изучение процессов постинсультной структурно-функциональной реорганизации головного мозга современными методами нейровизуализации».

Автор для переписки. Зудилина О.В., e-mail: ozudilina@inbox.ru

Для цитирования. Зудилина О.В., Попов В.В., Петровский Е.Д., Станкевич Ю.А., Тулупов А.А. Динамика функциональных сетей головного мозга в ранний восстановительный период ишемического инсульта по данным МРТ. *Сиб. науч. мед. ж.* 2026;46(1):71–81 doi: 10.18699/SSMJ20260105

Study of the dynamics of changes in functional brain networks in the early recovery period of ischemic stroke according to MRI data

O.V. Zudilina^{1,2}, V.V. Popov^{1,2}, E.D. Petrovskiy¹, Yu.A. Stankevich^{1,2}, A.A. Tulupov^{1,2}

¹ International Tomography Center of SB RAS
630090, Novosibirsk, Institutskaya st., 3a

² Novosibirsk State University
630090, Novosibirsk, Pirogova st., 1

Abstract

Aim of the study was to evaluate the dynamics of changes in functional brain networks (default mode network, DMN, and sensorimotor network, SMN) during the early recovery period following ischemic stroke, taking into account the volume of ischemic lesions according to MRI data. **Material and methods.** A dynamic MRI study of the brain was performed on a 3.0 T scanner in 137 patients at 1–3 days, 7–10 days, and 3–4 months after the onset of acute cerebrovascular accident, using a routine protocol (DWI-EPI, FLAIR-SPIR, T2-WI, T1W-TFE) supplemented with resting-state functional MRI. Additional assessment included the Montreal Cognitive Assessment (MoCA) and the modified Rankin scale. The study cohort comprised 36 patients diagnosed with acute ischemic supratentorial stroke who underwent at least two MRI examinations. **Results and discussion.** A trend ($p > 0.05$) towards increased functional connectivity between DMN and SMN regions was observed from the first to the third examination. The MoCA results ($p < 0.05$ for 2nd and 3rd study compared to 1st) showed improvement in cognitive functions over time, consistent with the clinical course. The most significant finding of the correlation analysis was a direct correlation between DMN and SMN connectivity at the first observation ($R = 0.57$; $p = 0.006$). Lesion volume was found to influence functional connectivity, with a significant effect of larger lesion size on DMN recovery dynamics ($R = 0.83$; $p = 0.04$). **Conclusions.** A parallel increase in intra-network connectivity of the DMN and SMN was demonstrated, indicating systemic functional reorganization of the brain following acute stroke. During the early recovery period, resting-state functional MRI revealed progressive restoration of DMN and SMN connectivity, accompanied by cognitive improvement as assessed by MoCA. Further research is required to clarify the mechanisms of DMN and SMN recovery, as well as the role of lesion volume and localization in functional network reorganization.

Key words: ischemic stroke, resting-state functional MRI, functional connectivity, default mode network, sensorimotor network.

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

Financing. The study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (№ 1023110800234-5-3.2.25;3.1.4;3.2.12 “A study of post-stroke structural and functional brain reorganization by modern neuroimaging methods”).

Correspondence author. Zudilina O.V., e-mail: ozudilina@inbox.ru

Citation. Zudilina O.V., Popov V.V., Petrovskiy E.D., Stankevich Yu.A., Tulupov A.A. Study of the dynamics of changes in functional brain networks in the early recovery period of ischemic stroke according to MRI data. *Sibirskiy nauchnyj medicinskij zhurnal = Siberian Scientific Medical Journal*. 2026;46(1):71–81. [In Russian]. doi: 10.18699/SSMJ20260105

Введение

По оценке ВОЗ, острые нарушения мозгового кровообращения (ОНМК) являются третьей лидирующей причиной смертности и инвалидности среди населения всех возрастов [1]. В структуре ОНМК около 80 % занимает ишемический инсульт, который входит в список основных причин инвалидизации населения – около 3,2 случая на 1000 населения [2]. Реабилитация после ишемического инсульта – длительный комплекс мероприятий, направленный на снижение смертности и инвалидизации в восстановительном периоде и увеличение количества функционально независимых пациентов, переживших острую фазу [3]. Обсуждается влияние на общую траекторию восстановления множества генетических, патофизиологических, социально-демографических и тера-

певтических факторов [4]. Для восстановления утраченных функций в головном мозге активируются естественные процессы нейропластичности. Значительное функциональное восстановление может произойти спонтанно в первые недели после эпизода ОНМК за счет компенсаторно-восстановительных механизмов в рамках адаптивной нейропластичности [5].

Функциональная МРТ покоя (resting-state fMRI, rs-fMRI) является неинвазивным, неионизирующим и сравнительно быстрым методом нейровизуализации, не требующим от пациента выполнения каких-либо специфических задач, что делает ее методом выбора для обследования пациентов с острым ишемическим инсультом, в том числе находящихся в тяжелом клиническом состоянии. Метод rs-fMRI во многих исследованиях

используется для оценки темпов и объема нейро-реабилитации после инсульта, черепно-мозговых травм или удаления опухолей головного мозга [6–8], ее проведение позволяет оценить функциональную связность регионов нейронных сетей головного мозга, которая отражает согласованность и синхронность временных колебаний сигнала, зависящего от уровня кислорода в крови, между различными областями мозга [9].

Учеными исследуется влияние органических заболеваний головного мозга на состояние сети режима работы по умолчанию (default mode network, DMN) в сравнении с клиническими проявлениями [10]. В классических работах отмечается, что DMN включает ряд корковых и подкорковых структур, таких как задняя поясная кора, ретроспленальная кора, медиальная префронтальная кора, латеральная теменная кора (включая угловую извилину), височные области, а также некоторые подкорковые узлы [11]. В настоящем исследовании для анализа DMN были выбраны регионы, наиболее изученные, систематично и комплексно вовлеченные в процессы внутреннего внимания и самореферентного мышления: передняя поясная кора, задняя поясная кора и латеральная теменная кора, роль которых в DMN подтверждается результатами исследований, указывающими на их вовлеченность в интеграцию когнитивных и эмоциональных процессов [12, 13]. Особенность DMN заключается в том, что относящиеся к ней области снижают свою активность во время выполнения задач, требующих внимания, а наивысшую активность демонстрируют при реализации различных форм сложного познания, связанных с памятью и абстрактным мышлением. Считается, что сеть режима по умолчанию реализует процессы, поддерживающие эмоциональную обработку, самореферентную умственную активность и воспоминания о предыдущем опыте [12]. За последние десятилетия выявлена роль DMN для многих когнитивных функций человека, таких как моральные суждения, эмпатические реакции, эстетические суждения, просмотр фильмов и понимание повествования, пространственная навигация и принятие решений [12, 13].

Сенсомоторная сеть (sensorimotor network, SMN) традиционно включает первичную моторную кору (прецентральная извилина), первичную соматосенсорную кору (постцентральная извилина), дополнительную моторную область, парацентральную дольку, а также подкорковые структуры, такие как таламус и мозжечок, обеспечивающие интеграцию сенсорной и моторной информации [14, 15]. В данном исследовании для анализа SMN выбраны корковые регионы, наибо-

лее релевантные для оценки двигательного восстановления после инсульта: прецентральная и постцентральная извилины, дополнительная моторная область и парацентральная долька. SMN играет основную роль в восприятии и обработке сенсорной и моторной информации, управлении информацией, связанной с движением, и контроле двигательной активности. Сенсомоторная сеть отвечает за восприятие внешних и внутренних стимулов, их обработку и реализацию ответных двигательных реакций. К стимулам SMN можно отнести внешние, такие как температура, давление и вибрация, и внутренние, такие как равновесие, координация, висцеральные ощущения [15].

Выбор для анализа пары DMN–SMN обусловлен их взаимодополняющей ролью в процессах восстановления после инсульта: DMN связана с когнитивным и эмоциональным восстановлением, тогда как SMN отражает динамику моторных функций. Их совместное изучение позволяет оценить системную перестройку мозга, а также выявить возможные корреляции между когнитивным и двигательным восстановлением, что особенно важно для разработки комплексных реабилитационных стратегий. Кроме этого исследование динамических изменений функциональной связности DMN и SMN методом rs-fMRI и поиск взаимоотношений между ними может позволить в дальнейшем использовать только исследование сети режима работы по умолчанию для прогнозирования реабилитационного потенциала и возможности восстановления двигательной активности у пациентов с тяжелым неврологическим дефицитом. Такие данные дадут возможность оценить индивидуальный требуемый объем медицинской помощи и корректировать тактику ведения пациентов.

Цель исследования – оценить динамику изменений функциональных нейронных сетей головного мозга (DMN и SMN) в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта с учетом объема ишемического поражения по данным МРТ.

Материал и методы

В исследование включены пациенты с клиникой острого ишемического инсульта, госпитализированные в неврологическое отделение и поступившие в томографический центр для проведения МРТ-исследования. Объектом исследования является функциональная реорганизация нейронных сетей, локализованных в коре больших полушарий головного мозга. Все пациенты подписали добровольное информированное согласие.

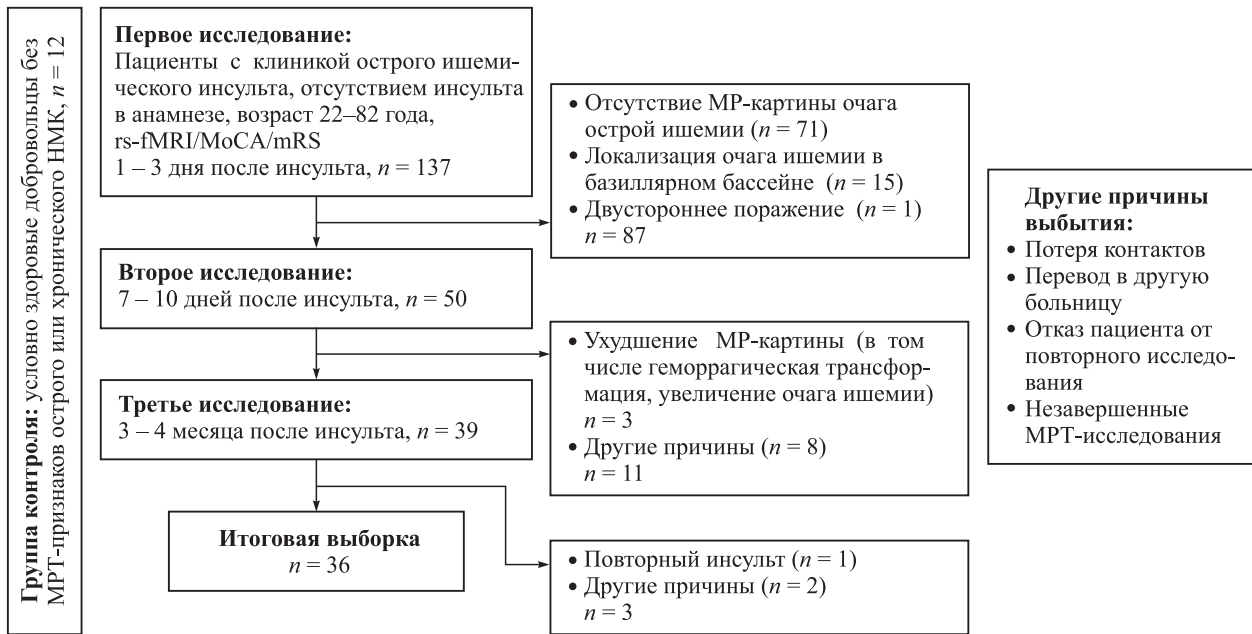


Рис. 1. Схема отбора пациентов в группу исследования

Fig. 1. Flowchart of patient selection for the study group

В группу контроля вошли 12 условно здоровых добровольцев (8 женщин и 4 мужчины, возраст от 18 до 23 лет (21 [19; 22] год). Критерии включения: возраст от 25 до 85 лет, отсутствие признаков острого или хронического НМК, неврологических дефицитов, объемно-очаговых изменений головного мозга по данным МРТ. Критерии исключения: обнаружение МРТ-признаков патологических изменений вещества головного мозга. Полученные по результатам rs-fMRI коэффициенты связности DMN и SMN были использованы в качестве референсных

Для формирования группы патологии набирались пациенты с клинической картиной, характерной для ишемического инсульта. Общее число больных, прошедших первое обследование (в течение первых трех суток) с предварительным диагнозом ОНМК, составило 137. В случае подтверждения диагноза данными МРТ пациенты проходили второе обследование на 7–10-е сутки и третье обследование через 3–4 месяца. Критерии включения: возраст от 25 до 85 лет, клиническая картина ОНМК, подтвержденная наличием очага ишемии в бассейне средней мозговой артерии, отсутствие инсультов в анамнезе, отсутствие психических заболеваний. Критерии исключения: двустороннее ишемическое поражение головного мозга, локализация очага ишемии в стволе головного мозга или мозжечке, менее двух пройденных наблюдений. В итоговую выборку включены 36

пациентов с подтвержденным диагнозом острого ишемического инсульта супратенториальной локализации и как минимум двумя МР-наблюдениями (рис. 1). В выборку вошли 12 женщин и 24 мужчины в возрасте от 43 до 75 лет (61 [51,075; 66] год).

Исследование выполнено при поддержке Локального этического комитета Международного томографического центра СО РАН (протокол № 2 от 29.04.2024) с условием подписания информированного добровольного согласия. Измерения проводились в Центре коллективного пользования «Масс-спектрометрические исследования» СО РАН на томографе Ingenia 3,0 Тл (Philips, США) (рис. 2). Стандартный протокол исследования головного мозга включал проведение структурной и функциональной МРТ с использованием последовательностей DWI-EPI (axi), FLAIR-SPiR (3D), T2-WI (axi), T1W-TFE (3D) с дополнением методики функциональной МРТ покоя (EPI-ISO) со следующими характеристиками: TR – 2500 мс, TE – 35 мс, количество срезов – 42, матрица – $80 \times 73 \times 42$, поле обзора – $200 \times 181 \times 105$ мм, размер вокселя – $2,5 \times 2,5 \times 2,5$ мм (ISO). Выполнен стандартный препроцессинг данных rs-fMRI с использованием программного обеспечения CONN версия 22.a, SPM версия 12.7771 с корректировкой движений, нормализацией анатомии по MNI, обнаружением артефактов, очисткой от шума и оценкой связности

между парами регионов интереса (ROI). В соответствии с атласами Harvard-Oxford и Automated Anatomical Labeling (AAL), интегрированных в CONN functional connectivity toolbox, усреднены сигналы от заданных областей изображений для каждой временной точки (200 шт). Временные динамики сигналов анализировались с помощью коэффициента корреляции, дополнительно проведено Z-преобразование Фишера. Рассчитаны средние значения для всех пар областей интереса (ROI-to-ROI) с формированием среднего результирующего значения функциональной связности для каждой сети.

Для анализа DMN выбраны следующие ROI: передняя поясная кора, задняя поясная кора и латеральная теменная кора. Для SMN анализировались прецентральная извилина (первичная моторная кора), постцентральная извилина (первичная соматосенсорная кора), дополнительная моторная область и парацентральная доля. Выбор ROI обусловлен их ключевой ролью в соответствующих сетях и возможностью отслеживания динамики в контексте постинсультного восстановления. В рамках корреляционного анализа оценивалась как внутрисетевая связность (средняя связность между всеми ROI внутри DMN и внутри SMN), так и межсетевая связность (средняя связность между всеми ROI DMN и всеми ROI SMN). Для анализа динамики использовались значения внутрисетевой связности.

Пациентам также проведены функциональные тесты с использованием Монреальской шкалы оценки когнитивных функций (Montreal Cognitive Assessment, MoCA) и опросника для оценки общей инвалидизации в виде модифицированной шкалы Рэнкина (modified Rankin Scale, mRS). Максимальным результатом по шкале MoCA-теста является 30 баллов, результат от 26 до 30 баллов свидетельствует об отсутствии когнитивного снижения, от 22 до 25 баллов – о легкой, от 10 до 21 балла – о средней, от 0 до 9 баллов – о тяжелой степени когнитивных нарушений [16]. Модифицированная шкала Рэнкина имеет градацию от 0 до 6 баллов, где 0 баллов указывает на отсутствие симптомов, 5 баллов ассоциировано с тяжелым нарушением жизнедеятельности, 6 баллов соответствует смерти пациента [17]. Кроме того, выполнена оценка объема очага ишемического поражения головного мозга в программе RadiAnt DICOM Viewer с помощью измерения наибольших диаметров очага в трех ортогональных плоскостях на изображениях в режиме FLAIR-SPiR (3D).

Для статистической обработки использовались непараметрические статистические методы, поскольку выборка пациентов является

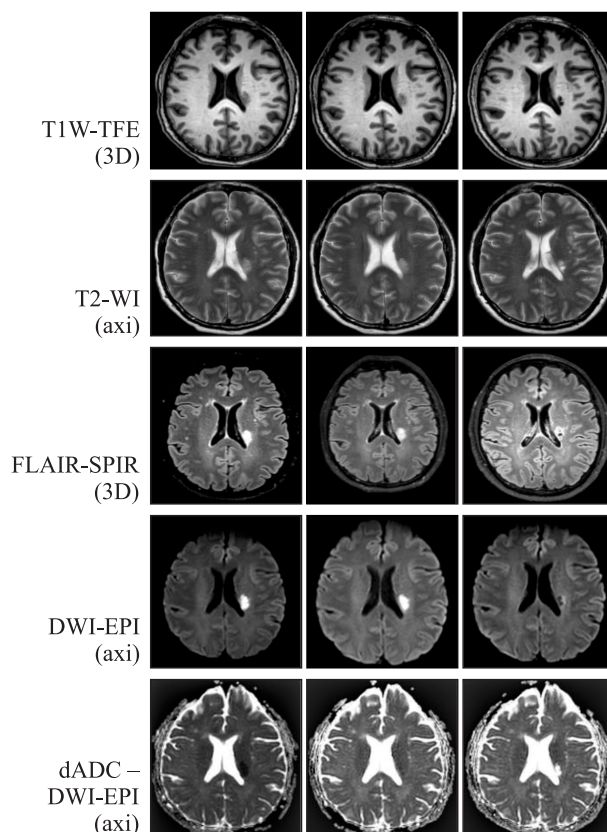


Рис. 2. МРТ-снимки, полученные в ходе исследования
Fig. 2. MRI scans obtained during the study

зависимой и имеет распределение значений исследуемых метрик, отличное от нормального: критерии Шапиро – Уилка, Колмогорова – Смирнова, Андерсона – Дарлинга, ранговая корреляция Спирмена (с применением поправки на множественные сравнения Бенджамини – Хохберга) и U-критерий Манна–Уитни. Переменные представлены в виде медианы и межквартильных интервалов (Me [Q1; Q3]).

Результаты

Построены анатомические модели SMN и DMN с выделением основных функциональных регионов (рис. 3), получены значения объемов ишемического поражения головного мозга, на основании анализа которых пациенты разделены на две подгруппы. Лица с объемом поражения менее 10 см³ были отнесены в подгруппу «малых объемов» (наибольшее значение в первом исследовании – 8 см³), в нее вошло 30 человек (11 женщин и 19 мужчин), возраст 61,6 [50,5; 65,15] года. В подгруппу «больших объемов» (более 10 см³, наименьшее и наибольшее значение в первом исследовании – соответственно 33 и 390 см³) вошло

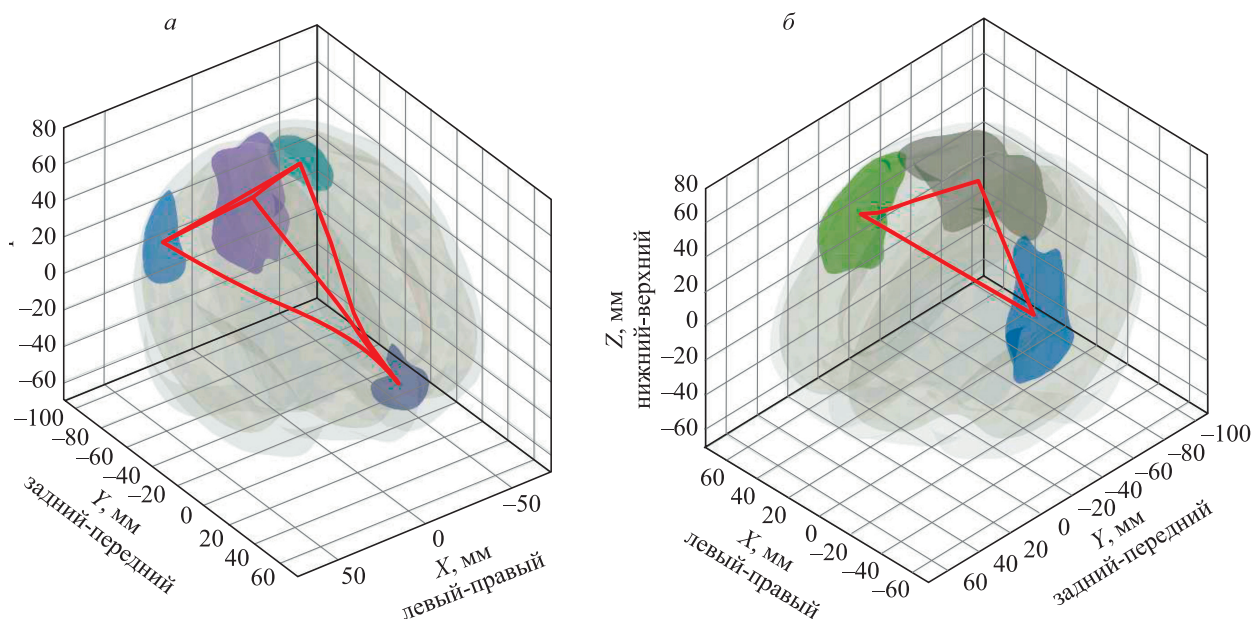


Рис. 3. Топография регионов сети пассивного режима работы мозга (а) и сенсомоторной сети (б)

Fig. 3. Topography of the default mode network regions (a) and the sensorimotor network (b)

6 пациентов (2 женщины и 4 мужчины), возраст 64,6 [56,3; 69,1] года. Определены статистически значимые различия между выделенными подгруппами по результатам оценки объема ишемического поражения ($p < 0,0001$) и результатам MoCA-тестирования ($p = 0,021$) при первом исследовании. Оценка результатов mRS-тестирования значимых различий не показала.

У условно здоровых добровольцев обнаружен относительно широкий размах значений связности для DMN (от 0,43 до 0,86) и заметно меньший для SMN (от 0,67 до 0,72) (рис. 4). У пациентов группы патологии определено увеличение размаха и межквартильного интервала связности нейронных сетей по сравнению с контролем во всех наблюдениях (см. рис. 4). Статистически значимые различия с группой контроля установлены при сравнении коэффициентов связности DMN и SMN в первом исследовании в подгруппе «больших объемов» ($p < 0,05$), но не «малых объемов». В динамике коэффициент связности регионов DMN и SMN статистически значимо не изменяется ни в общей группе пациентов (0,51 [0,28; 0,62] при первом исследовании, 0,57 [0,42; 0,70] при втором и 0,54 [0,46; 0,60] при третьем для DMN; 0,65 [0,42; 0,77], 0,60 [0,51; 0,80] и 0,70 [0,60; 0,93] соответственно для SMN), ни при их разделении на подгруппы малых и больших объемов (см. рис. 4). В то же время исследование влияния объема поражения на динамику восстановления SMN и DMN показало достоверное

значимое влияние большего объема на динамику восстановления DMN ($R = 0,83$, $p = 0,04$).

При анализе результатов тестов для оценки когнитивных функций и степени инвалидизации пациентов общей группы патологии обнаружено постепенное увеличение количества баллов, набранных по результатам проведения MoCA-теста от первого 23,0 [20,2; 25,8] ко второму 26,0 [23,5; 27,5] и третьему 27,0 [25,5; 29,0] исследованию и постепенное уменьшение числа набранных баллов по результатам mRS от первого 2,5 [2,0; 3,0] ко второму 1,0 [1,0; 2,0] и третьему 1,0 [1,0; 2,0] исследованию; различия между первым и вторым, и первым и третьим исследованием в подгруппе малых объемов для MoCA статистически значимы ($p < 0,05$).

В результате корреляционного анализа выявлена статистически значимая зависимость между степенью связности DMN и SMN в первом исследовании, которая значительно снижается ко второму и третьему исследованию (таблица).

Обсуждение

Ранее в литературе представлен ряд исследований, изучающих функциональную связность головного мозга [18, 19], работу DMN [20, 21] и SMN [14, 22], а также взаимосвязь между ними при различных состояниях [23–25], что демонстрирует высокий интерес исследователей к функциональным нейронным сетям головного

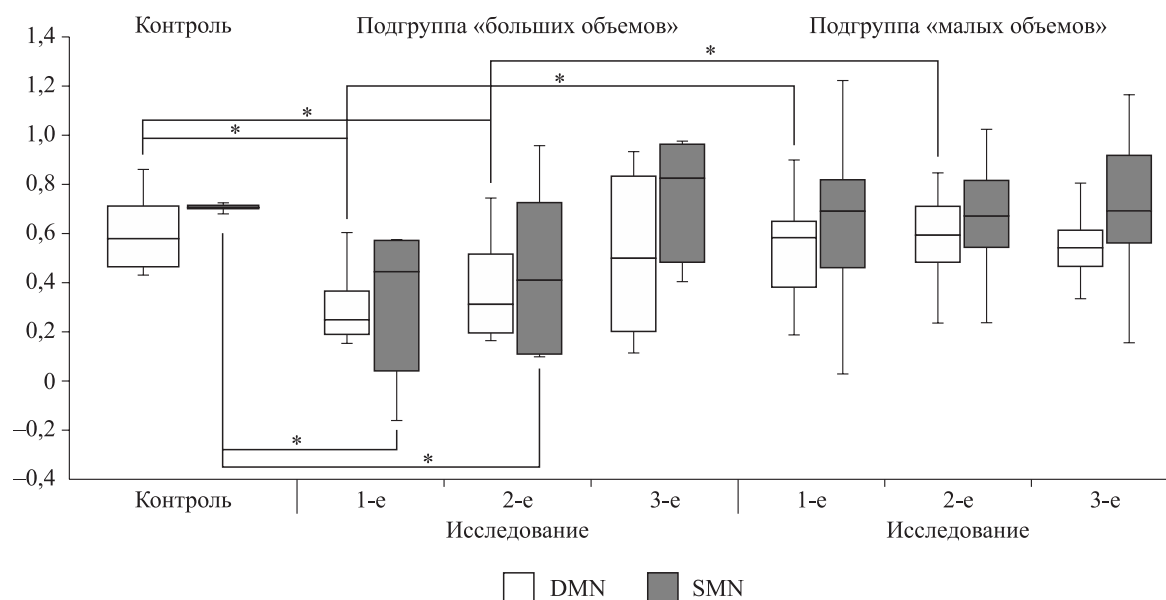


Рис. 4. Динамика значений коэффициентов связности DMN и SMN (* – $p < 0,05$)

Fig. 4. Dynamics of DMN and SMN connectivity coefficients (* – $p < 0.05$)

мозга, в том числе у пациентов после манифестации ишемического инсульта [26, 27]. В данной работе проведен комплексный анализ реорганизации головного мозга в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта с учетом динамики объема поражения, связности DMN и SMN нейронных сетей и моторно-когнитивных изменений по данным тестов MoCA и модифицированной шкалы Рэнкина. На структурном уровне показано уменьшение объема ишемического поражения, что свидетельствует о закономерной

динамике в виде постепенной редукции отека и формирования участка кистозно-атрофической дегенерации мозговой ткани, характерной для патогенеза ишемического инсульта [28, 29].

У условно здоровых пациентов обнаружена большая вариабельность значений связности для DMN в сравнении с SMN. Это может быть обусловлено особенностями выполняемых данными сетями функций: функциональная связность регионов DMN отражает индивидуальные различия жизненного опыта пациентов, их образа мышле-

Корреляционные взаимоотношения между значением функциональной связности DMN, SMN, теста MoCA, mRS

Correlational relationships between functional connectivity values of the DMN and SMN, MoCA scores, mRS scores, and ischemic lesion volume

Сравниваемые показатели	Первое исследование		Второе исследование		Третье исследование	
	<i>R</i>	<i>p</i>	<i>R</i>	<i>p</i>	<i>R</i>	<i>p</i>
DMN–SMN	0,57	0,006	0,23	0,45	0,10	0,75
DMN–MoCA	0,29	0,43	0,43	0,20	0,13	0,75
DMN–mRS	–0,14	0,75	0,01	0,94	–0,03	0,94
DMN–vol	–0,35	0,43	–0,24	0,45	–0,37	0,43
SMN–MoCA	0,20	0,45	0,33	0,43	0,00	0,94
SMN–mRS	–0,33	0,45	–0,26	0,67	0,48	0,45
SMN–vol	–0,26	0,45	–0,23	0,45	0,09	0,79

Примечание. vol – объем ишемического поражения.

ния и уровня самосознания [30], в то время как основные двигательные паттерны, обусловленные работой SMN, для всех пациентов являются общими [31]. Размах полученных данных группы контроля для SMN, не превышающий 0,05, демонстрирует невысокую индивидуальную вариабельность связности сенсомоторной сети у лиц без признаков острого или хронического ИМК, что позволяет оценить качество выполнения исследований как высокое.

Выявленная прямая корреляция между внутрисетевой связностью DMN и SMN в остром периоде (первое исследование, $R = 0,57$; $p = 0,006$) может отражать системный ответ мозга на ишемическое повреждение. В остром периоде инсульта наблюдается глобальное снижение функциональной сегрегации сетей, что может приводить к временному увеличению корреляции между различными сетями, включая DMN и SMN, как проявление дедифференциации сетевой архитектуры. По мере восстановления (второе и третье исследования) эта зависимость снижается, что согласуется с постепенной нормализацией сетевой организации и отсутствием корреляции между DMN и исполнительными сетями, включая SMN, характерной для здорового мозга [25, 26]. Более высокая связность SMN в подгруппе «больших объемов» к третьему исследованию по сравнению с подгруппой «малых объемов» может быть объяснена компенсаторной гиперактивацией сенсомоторной сети у пациентов с более обширным повреждением. При значительном объеме поражения вовлечение ипсилатеральных моторных регионов, а также дополнительной моторной области может быть более выраженным для поддержания двигательных функций, что проявляется в увеличении внутрисетевой связности SMN [27]. В то же время у лиц с «малыми объемами» поражения восстановление может происходить за счет более быстрой реорганизации с вовлечением не только SMN, но и других сетей (например, сети внимания), приводя к относительному снижению внутрисетевой связности SMN как признаку более «экономичной» и специфичной реорганизации. Этот феномен требует дальнейшего изучения с учетом конкретных двигательных задач и индивидуальных траекторий восстановления.

Известно, что DMN и SMN имеют обратное взаимодействие друг с другом: активация одной сопровождается инактивацией другой [26]. Заметное улучшение связности DMN, отмечаемое между первым и вторым исследованием в обеих подгруппах, вероятно, связано с активной терапевтической тактикой, проводимой в лечебном учреждении. Последующее увеличение связно-

сти DMN в подгруппе больших объемов можно объяснить более выраженным повреждением сети, восстановление которой у данных пациентов требует более длительного промежутка времени. Некоторое снижение связности между регионами DMN к третьему исследованию в подгруппе малых объемов отражает наиболее эффективное восстановление связности в первые месяцы после повреждения [32]. Для подтверждения этой гипотезы требуется более длительное наблюдение за пациентами. В обеих подгруппах отмечается заметное уменьшение межквартильного размаха значений связности DMN при переходе от первого к третьему исследованию, что свидетельствует о высокой способности сети к репарации связности до близких к нормальным значений за достаточно короткий период времени [7, 32].

Средние значения связности SMN в группе контроля ожидаемо больше, чем во всех трех исследованиях в группе патологии, так как возрастное снижение связности SMN характерно для здоровых людей старшей возрастной группы [33]. Ее уменьшение в период между первым и вторым исследованием, вероятно, обусловлено естественным течением нейропластических процессов в остром периоде ишемического инсульта, а увеличение к третьему исследованию, скорее всего, связано с возрастающей степенью активации пациентов после выписки из лечебного учреждения. Можно предположить, что ранняя активация пациентов может оказать благоприятное воздействие на темпы и степень восстановления связности сенсомоторной сети [34]. Анализ межквартильного размаха значений связности SMN демонстрирует высокую их вариабельность во всех исследованиях, что согласуется с литературными данными [35] об изменении двигательных паттернов у пациентов после инсульта и, вероятно, может быть подтверждено различной клинической картиной двигательных дефицитов или их отсутствия у различных пациентов [36].

Результаты теста определения уровня когнитивных способностей пациентов MoCA показывают устойчивую положительную динамику в виде увеличения набранных пациентами баллов в пределах 17 %, что свидетельствует о постепенном достоверном восстановлении когнитивных функций после эпизода ИМК и согласуется с данными литературных источников [37]. Результаты mRS отражают степень общей инвалидизации пациентов, а также их зависимости от помощи посторонних лиц, что свидетельствует о постепенном восстановлении бытовой самостоятельности при переходе из острого в хронический восстановительный период и подтверждается

данными литературы [38]. В нашем исследовании получено закономерное снижение результатов теста в пределах 44 %. Динамика результатов mRS закономерно согласуется с динамикой связности регионов SMN, так как вопросы тестирования в основном ориентированы на оценку двигательной активности пациента.

Заключение

Проведенное исследование показало, что нейронные сети DMN и SMN по данным rs-fMRI демонстрируют тенденцию к восстановлению, что согласуется с положительной динамикой когнитивных и двигательных функций, оцениваемых по шкалам MoCA и mRS, при переходе от острого периода ОНМК к подострому и хроническому восстановительному этапам. Выявленная значимая прямая корреляция между показателями функциональной связности DMN и SMN указывает на согласованные изменения в этих сетях и отражает системную функциональную перестройку головного мозга в остром периоде инсульта. При этом больший объем ишемического поражения оказался более значимым фактором нарушения функциональной связности указанных сетей, тогда как влияние локализации очага требует дальнейшего изучения. Полученные результаты подчеркивают необходимость продолжения исследований, направленных на уточнение закономерностей восстановления активности DMN и SMN в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта, а также на выявление факторов, определяющих индивидуальные траектории нейрональной реорганизации.

Список литературы / References

1. Xiucan G., Ziping Z., Xueyan Y., Qirong Xu, Feng L., Feng Z. Global burden of ischemic stroke attributable to high body mass index in 204 countries and territories, 1990–2021. *BMC Cardiovasc. Disord.* 2024;24,584. doi: 10.1186/s12872-024-04259-2
2. Игнатьева В.И., Вознюк И.А., Шамалов Н.А., Резник А.В., Виницкий А.А., Деркач Е.В. Социально-экономическое бремя инсульта в Российской Федерации. *Ж. неврол. и психиатрии.* 2023;123(8–2):5–15. doi: 10.17116/jnevro20231230825
- Ignatyeva V.I., Voznyuk I.A., Shamalov N.A., Reznik A.V., Vinitskiy A.A., Derkach E.V. Social and economic burden of stroke in Russian Federation. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii imeni Sergeya Sergeevicha Korsakova = S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry.* 2023;123(8–2):5–15. [In Russian]. doi: 10.17116/jnevro20231230825

3. GBD 2019 Stroke Collaborators. Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990–2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet Neurol.* 2021;20(10):795–820. doi: 10.1016/S1474-4422(21)00252-0

4. Нувахова М.Б. Реабилитация пациентов с когнитивными нарушениями после инсульта в позднем восстановительном периоде. *Ж. неврол. и психиатрии.* 2021;121(8–2):76–85. doi: 10.17116/jnevro202112108276

Nuvakhova M.B. Rehabilitation of patients with cognitive impairment after stroke during the late recovery period. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii imeni Sergeya Sergeevicha Korsakova = S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry.* 2021;121(8–2):76–85. [In Russian]. doi: 10.17116/jnevro202112108276

5. Alawieh A., Zhao J., Feng W. Factors affecting post-stroke motor recovery: Implications on neurotherapy after brain injury. *Behav Brain Res.* 2018;340:94–101. doi: 10.1016/j.bbr.2016.08.029

6. Живолупов С.А., Вознюк И.А., Самарцев И.Н., Кравчук А.Ю., Бондаренко Ж.Е. Адаптивная нейропластичность, связанная с ишемическим повреждением головного мозга, и ее роль в восстановлении больных после инсульта: теоретические предпосылки эффективной нейрореабилитации. *Эффектив. фармакотерапия.* 2020;16(31):24–38. doi: 10.33978/2307-3586-2020-16-31-24-38

Zhivolupov S.A., Voznyuk I.A., Samartsev I.N., Kravchuk A.Yu., Bondarenko Zh.E. Adaptive neuroplasticity after ischemic brain damage and its contribution to the recovery of patients after stroke: Theoretical prerequisites for effective neurorehabilitation. *Effektivnaya farmakoterapiya = Effective Pharmacotherapy.* 2020;16(31):24–38. [In Russian]. doi: 10.33978/2307-3586-2020-16-31-24-38

7. Crofts A., Kelly M.E., Gibson C.L. Imaging functional recovery following ischemic stroke: Clinical and preclinical fMRI studies. *J. Neuroimaging.* 2020;30(1):514. doi: 10.1111/jon.12668

8. Yamashita K.I., Uehara T., Taniwaki Y., Tobimatsu S., Kira J.I. Long-term effect of acetylcholinesterase inhibitors on the dorsal attention network of Alzheimer’s disease patients: A pilot study using resting-state functional magnetic resonance imaging. *Front Aging Neurosci.* 2022;14:810206. doi: 10.3389/fnagi.2022.810206

9. Has Silemek A.C., Chen H., Sati P., Gao W. The brain’s first “traffic map” through Unified Structural and Functional Connectivity (USFC) modeling. *Commun. Biol.* 2024;7(1):1477. doi: 10.1038/s42003-024-07160-y

10. Станкевич Ю.А., Попов В.В., Богомякова О.Б., Василькив Л.М., Тулупов А.А., Сагдеев Р.З. Визуализация нейропластичности головного мозга в аспекте постинсультной реабилитации. *Комплек.*

пробл. серд.-сосуд. заболев. 2024;13(4):214–228. doi: 10.17802/2306-1278-2024-13-4-214-228

Stankevich Yu.A., Popov V.V., Bogomyakova O.B., Vasil'kiv L.M., Tulupov A.A., Sagdeev R.Z. Visualization of brain neuroplasticity in the aspect of post-stroke rehabilitation. *Kompleksnyye problemy serdechno-sosudistykh zabolovaniy = Complex Issues of Cardiovascular Diseases*. 2024;13(4):214–228. [In Russian]. doi: 10.17802/2306-1278-2024-13-4-214-228

11. Alves P.N., Foulon C., Karolis V., Bzdok D., Margulies D.S., Volle E., Thiebaut de Schotten M. An improved neuroanatomical model of the default-mode network reconciles previous neuroimaging and neuropathological findings. *Commun. Biol.* 2019;2:370. doi: 10.1038/s42003-019-0611-3.

12. Menon V. 20 years of the default mode network: A review and synthesis. *Neuron*. 2023;111(16):2469–2487. doi: 10.1016/j.neuron.2023.04.023.

13. Smallwood J., Bernhardt B.C., Leech R., Bzdok D., Jefferies E., Margulies D.S. The default mode network in cognition: a topographical perspective. *Nat. Rev. Neurosci.* 2021;22(8):503–513. doi: 10.1038/s41583-021-00474-4

14. Caspers J., Rubbert C., Eickhoff S.B., Hoffstaedter F., Südmeyer M., Hartmann C.J., Sigl B., Teichert N., Aissa J., Turowski B., Schnitzler A., Mathys C. Within- and across-network alterations of the sensorimotor network in Parkinson's disease. *Neuroradiology*. 2021;63(12):2073–2085. doi: 10.1007/s00234-021-02731-w

15. Hans J.D. Clinical neuroanatomy: Brain circuitry and its disorders. 2nd ed. Cham: Springer, 2020. 981p.

16. Nasreddine Z.S., Phillips N.A., Bedirian V., Charbonneau S., Whitehead V., Collin I., Cummings J.L., Chertkow H. The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: a brief screening tool for mild cognitive impairment. *J. Am. Geriatr. Soc.* 2005;53(4):695–699. doi: 10.1111/j.1532-5415.2005.53221.x

17. Супонева Н.А., Юсупова Д.Г., Жирова Е.С., Мельченко Д.А., Таратухина А.С., Бутковская А.А., Ильина К.А., Зайцев А.Б., Зимин А.А., Ключков А.С., Люкманов Р.Х., Калинин М.Э., Пирадов М.А., Котов-Смоленский А.М., Хижникова А.Е. Валидация модифицированной шкалы Рэнкина (The Modified Rankin Scale, MRS) в России. *Неврол., нейропсихиатрия, психосоматика*. 2018;10(4):36–39. doi: 10.14412/2074-2711-2018-4-36-39

Suponeva N.A., Yusupova D.G., Zhirova E.S., Melchenko D.A., Taratukhina A.S., Butkovskaya A.A., Ilyina K.A., Zaitsev A.B., Zimin A.A., Klochkov A.S., Lyukmanov R.Kh., Kalinkina M.E., Piradov M.A., Kotov-Smolensky A.M., Khizhnikova A.E. Validation of the modified Rankin Scale in Russia. *Nevrologiya, neyropsikhiatriya, psikhosomatika = Neurology, Neuropsychiatry, Psychosomatics*. 2018;10(4):36–39. [In Russian]. doi: 10.14412/2074-2711-2018-4-36-39

18. Wu L., Wang X., Liu Q., Chai L., Tian S., Wu W. A study on alterations in functional activity in migraineurs during the interictal period. *Heliyon*. 2022;9(1):e12372. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12372

19. Miao J., Tantawi M., Alizadeh M., Thalheimer S., Vedaei F., Romo V., Mohamed F.B., Wu C. Characteristic dynamic functional connectivity during sevoflurane-induced general anesthesia. *Sci. Rep.* 2023;13(1):21014. doi: 10.1038/s41598-023-43832-1

20. Parsons N., Bowden S.C., Vogrin S., D'Souza W.J. Default mode network dysfunction in idiopathic generalised epilepsy. *Epilepsy Res.* 2020;159:106254. doi: 10.1016/j.epilepsyres.2019.106254.

21. Borserio B.J., Sharpley C.F., Bitsika V., Sarmukadam K., Fourie P.J., Agnew L.L. Default mode network activity in depression subtypes. *Rev. Neurosci.* 2021;32(6):597–613. doi: 10.1515/revneuro-2020-0132.

22. Cassady K., Gagnon H., Freiburger E., Lalwani P., Simmonite M., Park D.C., Peltier S.J., Taylor S.F., Weissman D.H., Seidler R.D., Polk T.A. Network segregation varies with neural distinctiveness sensorimotor cortex. *Neuroimage*. 2020;212:116663. doi: 10.1016/j.neuroimage.2020.116663

23. Tumati S., Paulus M.P., Northoff G. Out-of-step: brain-heart desynchronization in anxiety disorders. *Mol. Psychiatry*. 2021;26(6):1726–1737. doi: 10.1038/s41380-021-01029-w

24. Stern E.R., Eng G.K., de Nadai A.S., Iosifescu D.V., Tobe R.H., Collins K.A. Imbalance between default mode and sensorimotor connectivity is associated with perseverative thinking in obsessive-compulsive disorder. *Transl. Psychiatry*. 2022;12(1):19. doi: 10.1038/s41398-022-01780-w

25. Wu C.W., Lin S.N., Hsu L.M., Yeh S.C., Guu S.F., Lee S.H., Chen C.C. Synchrony between default-mode and sensorimotor networks facilitates motor function in stroke rehabilitation: A pilot fMRI study. *Front. Neurosci.* 2020;14:548. doi: 10.3389/fnins.2020.00548

26. Boren S.B., Savitz S.I., Ellmore T.M., Arevalo O.D., Aronowski J., Silos C., George S., Haque M.E. Longitudinal resting-state functional magnetic resonance imaging study: A seed-based connectivity biomarker in patients with ischemic and intracerebral hemorrhage stroke. *Brain Connect.* 2023;13(8):498–507. doi: 10.1089/brain.2022.0017

27. Chen H., Shi M., Zhang H., Zhang Y.D., Geng W., Jiang L., Wang Z., Chen Y.C., Yin X. Different patterns of functional connectivity alterations within the default-mode network and sensorimotor network in basal ganglia and pontine stroke. *Med. Sci. Monit.* 2019;25:9585–9593. doi: 10.12659/MSM.918185

28. Koukalova L., Chmelova M., Amlerova Z., Vargova L. Out of the core: the impact of focal ischemia in regions beyond the penumbra. *Front. Cell. Neurosci.* 2024;18:1336886. doi: 10.3389/fncel.2024.1336886.

29. Гусев Е.И., Коновалов А.Н., Гехт А.Б. Неврология. Национальное руководство. Краткое издание. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2018. 688 с.
- Gusev E.I., Konovalov A.N., Gekht A.B. Neurology. National Guidelines. Concise Edition. Moscow: GEOTAR-Media, 2018. 688 p. [In Russian].
30. Dobryakova E., Smith D.V. Reward enhances connectivity between the ventral striatum and the default mode network. *Neuroimage*. 2022;258:119398. doi: 10.1016/j.neuroimage.2022.119398
31. Hofmann V., Geurten B.R.H., Sanguinetti-Scheck J.I., Gamez-Sena L., Engelmann J. Motor patterns during active electrosensory acquisition. *Front. Behav. Neurosci.* 2014;8:186. doi: 10.3389/fnbeh.2014.00186
32. Vicentini J.E., Weiler M., Casseb R.F., Almeida S.R., Valler L., de Campos B.M., Li L.M. Subacute functional connectivity correlates with cognitive recovery six months after stroke. *Neuroimage Clin.* 2021;29:102538. doi: 10.1016/j.nicl.2020.102538.
33. Bain K.A., Kosik K.B., Terada M., Gribble P.A., Johnson N.F. Contralateral thalamocortical connectivity is related to postural control in the uninjured limb of older adults with history of ankle sprain. *Gait Posture*. 2024;109:115–119. doi: 10.1016/j.gaitpost.2024.01.015
34. Aderinto N., AbdulBasit M.O., Olatunji G., Adejumo T. Exploring the transformative influence of neuroplasticity on stroke rehabilitation: a narrative review of current evidence. *Ann. Med. Surg. (Lond.)*. 2023;85(9):4425–4432. doi: 10.1097/MS9.0000000000001137
35. van der Laag P.J., Wondergem R., Pisters M.F. Movement behavior patterns composition remains stable, but individuals change their movement behavior pattern over time in people with a first-ever stroke. *Eur. Rev. Aging Phys. Act.* 2022;19(1):11. doi: 10.1186/s11556-022-00290-4
36. Левин О.С., Боголепова А.Н. Постинсультные двигательные и когнитивные нарушения: клинические особенности и современные подходы к реабилитации. *Ж. неврол. и психиатрии*. 2020;120(11):99–107. doi: 10.17116/jnevro202012011199
- Levin O.S., Bogolepova A.N. Poststroke motor and cognitive impairments: clinical features and current approaches to rehabilitation. *Zhurnal neurologii i psikiatrii imeni Sergeya Sergeevicha Korsakova = S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2020;120(11):99107. [In Russian]. doi: 10.17116/jnevro202012011199
37. Котов С.В., Борисова В.А., Слюнькова Е.В., Исакова Е.В., Киселев А.В., Котов А.С. Динамика восстановления когнитивного дефицита у пациентов в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта. *Ж. неврол. и психиатрии*. 2021;121(11):26–32. doi: 10.17116/jnevro202112111126
- Kotov S.V., Borisova V.A., Slyunkova E.V., Isakova E.V., Kiselev A.V., Kotov A.S. Dynamics of recovery of cognitive deficit in patients in the early recovery period of ischemic stroke. *Zhurnal neurologii i psikiatrii imeni Sergeya Sergeevicha Korsakova = S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2021;121(11):26–32. [In Russian]. doi: 10.17116/jnevro202112111126
38. Liu C., Zhang S., Yao Y., Su C., Wang Z., Wang M., Zhu W. Associations between diffusion dynamics and functional outcome in acute and early subacute ischemic stroke. *Clin. Neuroradiol.* 2020;30(3):517–524. doi: 10.1007/s00062-019-00812-1

Сведения об авторах:

Зудилина Ольга Викторовна, ORCID: 0009-0000-7074-0838, e-mail: ozudilina@inbox.ru
Попов Владимир Владимирович, ORCID: 0000-0003-3082-2315, e-mail: v.popov1@g.nsu.ru
Петровский Евгений Дмитриевич, ORCID: 0000-0003-4325-4062, e-mail: petrovskiy@tomo.nsc.ru
Станкевич Юлия Александровна, к.м.н., ORCID: 0000-0002-7959-5160, e-mail: stankevich@tomo.nsc.ru
Тулупов Андрей Александрович, д.м.н., проф., чл.-корр. РАН, ORCID: 000-0002-1277-4113,
e-mail: taa@tomo.nsc.ru

Information about the authors:

Olga V. Zudilina, ORCID: 0009-0000-7074-0838, e-mail: ozudilina@inbox.ru
Vladimir V. Popov, ORCID: 0000-0003-3082-2315, e-mail: v.popov1@g.nsu.ru
Evgeniy D. Petrovskiy, ORCID: 0000-0003-4325-4062, e-mail: petrovskiy@tomo.nsc.ru
Yulia A. Stankevich, candidate of medical sciences, ORCID: 0000-0002-7959-5160, e-mail: stankevich@tomo.nsc.ru
Andrey A. Tulupov, doctor of medical sciences, professor, corresponding member of RAS, ORCID: 000-0002-1277-4113, e-mail: taa@tomo.nsc.ru

Поступила в редакцию 02.09.2025
После доработки 13.01.2026
Принята к публикации 18.01.2026

Received 02.09.2025
Revision received 13.01.2026
Accepted 18.01.2026