



Функциональная магнитно-резонансная томография в прогнозировании результатов реабилитации после инсульта: экспериментальное клиническое исследование

Погонченкова И.В.¹, Костенко Е.В.^{1,2}, Кашежев А.Г.¹, Петрова Л.В.^{1,*}

¹ Московский научно-практический центр медицинской реабилитации, восстановительной и спортивной медицины им. С.И. Спасокукоцкого Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

² Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

ВВЕДЕНИЕ. Определение реабилитационного потенциала (РП) после ишемического инсульта (ИИ) является важным аспектом для прогноза восстановления нарушенных функций и выбора реабилитационных мероприятий. В настоящее время не существует универсального и достоверного метода определения реабилитационного потенциала. Имеющиеся протоколы предназначены для определения прогноза в основном в остром периоде ИИ и не обладают достаточной специфичностью и чувствительностью. В качестве одного из возможных методов определения реабилитационного потенциала может рассматриваться функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ).

ЦЕЛЬ. Определение возможности использования фМРТ в качестве предиктора функционального восстановления после перенесенного ИИ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. В исследовании приняли участие 34 пациента (возраст составил 62,0 [58,0; 65,0] года) в ранний восстановительный период ИИ с геми- или монопарезом от 2 до 4 баллов по MRC, проходившие медицинскую реабилитацию (МР) на базе ГАУЗ «Московский научно-практический центр медицинской реабилитации, восстановительной и спортивной медицины им. С.И. Спасокукоцкого Департамента здравоохранения города Москвы» в течение 12 дней. Всем пациентам проводилась кинезиотерапия и физиотерапевтическое лечение. Для анализа динамики функциональных нарушений использовали шкалы MRCS, MAS, FMA-UE, NHPT, FAT, ARAT, BBT, TUG, Тинетти, BBS, RMI, BI. Всем пациентам была проведена фМРТ с простой двигательной задачей для каждой конечности с целью определения степени активации зон коры головного мозга.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. По завершении курса МР выявлена статистически значимая динамика по шкалам Тинетти, NHPT, BBT, BBS, FMA-UE, RMI и BI, TUG, ARAT, FAT, MRCS ($p < 0,01$). Динамика функционального восстановления у пациентов с высокой степенью активации коры головного мозга показала лучшие результаты по FMA UE без достоверных различий с пациентами с низкой активацией коры. Выявлены отличия в активности отдельных зон головного мозга при выполнении элементарного моторного задания. Увеличение активности в пораженном полушарии во время выполнения простого задания паретичной конечностью демонстрировало тенденцию к лучшему восстановлению функции, хотя и не достигало статистической значимости ($p = 0,056$). У пациентов с низкой степенью активации пораженного полушария при выполнении движений паретичной рукой дополнительно активировалось ипсилатеральное полушарие мозжечка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты исследования не позволяют с уверенностью утверждать о надежности фМРТ для прогнозирования функционального восстановления. Необходимо дальнейшее изучение фМРТ для оценки эффективности применения метода в клинической практике.

РЕГИСТРАЦИЯ: Идентификатор Clinicaltrials.gov № NCT05944666; зарегистрировано 06.07.2023.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: функциональная МРТ, нейрореабилитация, реабилитационный потенциал, двигательная реабилитация, медицинская реабилитация, нейровизуализация

Для цитирования / For citation: Погонченкова И.В., Костенко Е.В., Кашежев А.Г., Петрова Л.В. Функциональная магнитно-резонансная томография в прогнозировании результатов реабилитации после инсульта: экспериментальное клиническое исследование. Вестник восстановительной медицины. 2025; 24(3):66–76. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2025-24-3-66-76> [Pogonchenkova I.V., Kostenko E.V., Kashezhev A.G., Petrova L.V. Functional Magnetic Resonance Imaging in Predicting Post-Stroke Rehabilitation Outcomes: a Pilot Clinical Study. Bulletin of Rehabilitation Medicine. 2025; 24(3):66–76. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2025-24-3-66-76> (In Russ.).]

* Для корреспонденции: Петрова Людмила Владимировна, E-mail: ludmila.v.petrova@yandex.ru, nauka-org@mail.ru

Статья получена: 24.03.2025
Статья принята к печати: 11.04.2025
Статья опубликована: 16.06.2025

Functional Magnetic Resonance Imaging in Predicting Post-Stroke Rehabilitation Outcomes: a Pilot Clinical Study

 Irena V. Pogonchenkova¹,  Elena V. Kostenko^{1,2},  Alim G. Kashezhev¹,
 Liudmila V. Petrova^{1,*}

¹ S.I. Spasokukotsky Moscow Centre for Research and Practice in Medical Rehabilitation, Restorative and Sports Medicine of Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

² Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia

ABSTRACT

INTRODUCTION. Determining the rehabilitation potential (RP) after ischemic stroke (IS) is a key aspect for predicting the restoration of impaired functions and selecting appropriate rehabilitation strategies. Currently, there is no universal and reliable method for assessing RP. Existing protocols are primarily designed to predict outcomes in the acute phase of IS and lack sufficient specificity and sensitivity. Functional magnetic resonance imaging (fMRI) may be considered a potential method for RP assessment.

AIM. To evaluate the feasibility of using fMRI as a predictor of functional recovery following IS.

MATERIALS AND METHODS. The study included 34 patients (age 62.0 [58.0; 65.0] years) in the early recovery period after IS, presenting with hemi- or monoparesis scored between 2 and 4 on the MRC scale, who underwent medical rehabilitation (MR) at the S.I. Spasokukotsky Moscow Centre for Research and Practice in Medical Rehabilitation, Restorative and Sports Medicine for 12 days. All patients received kinesiotherapy and physiotherapy. To assess baseline status and track changes in functional impairments, the following scales were used: MRCS, MAS, FMA, NHPT, FAT, ARAT, BBT, TUG, Tinetti, BBS, RMI, BI. All participants underwent fMRI with a simple motor task for each limb to evaluate the degree of activation in the cerebral cortex.

RESULTS AND DISCUSSION. Upon completion of the MR course, statistically significant improvements were observed in the Tinetti, NHPT, BBT, BBS, FMA-UE, RMI, BI, TUG, ARAT, FAT, MRCS scales ($p < 0.01$). Patients with higher cortical activation showed better outcomes in FMA-UE scores, although no statistically significant differences were found compared to those with lower cortical activation. Distinct activation patterns in specific brain areas were observed during the performance of elementary motor tasks. Increased activity in the affected hemisphere during paretic limb movements was associated with a trend toward better recovery, though this did not reach statistical significance ($p = 0.056$). In patients with low activation of the affected hemisphere, ipsilateral cerebellar hemisphere activation was additionally observed during movement of the paretic hand.

CONCLUSION. The study results do not provide sufficient evidence to confirm the reliability of fMRI in predicting functional recovery. Further research is required to evaluate the effectiveness of this method in clinical practice.

REGISTRATION: Clinicaltrials.gov identifier No. NCT05944666, registered 06.07.2023.

KEYWORDS: functional MRI, neurorehabilitation, rehabilitation potential, motor rehabilitation, medical rehabilitation, neuroimaging

For citation: Pogonchenkova I.V., Kostenko E.V., Kashezhev A.G., Petrova L.V. Functional Magnetic Resonance Imaging in Predicting Post-Stroke Rehabilitation Outcomes: a Pilot Clinical Study. Bulletin of Rehabilitation Medicine. 2025; 24(3):66–76. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2025-24-3-66-76> (In Russ.).

* **For correspondence:** Liudmila V. Petrova, E-mail: ludmila.v.petrova@yandex.ru, nauka-org@mail.ru

Received: 24.03.2025

Accepted: 11.04.2025

Published: 16.06.2025

ВВЕДЕНИЕ

Ишемический инсульт (ИИ) остается второй по распространенности причиной смерти и ведущей причиной инвалидизации, несмотря на успехи в профилактике и лечении. Среди выживших после ИИ пациентов 10–25 % восстанавливают утраченные функции до исходного уровня, остальные сохраняют либо инвалидизирующие, либо значительно ухудшающие качество жизни последствия [1–4].

Прогнозирование функционального исхода после инсульта является важным аспектом для планирования реабилитационных мероприятий, определения индивидуальной траектории восстановления пациента и оптимизации распределения ресурсов здравоохранения. Методы клинической оценки с помощью шкал ограничены своей субъективностью и недостаточной чувствительностью к нейронным механизмам, лежащим

в основе восстановления. В последние годы исследователями и клиницистами накоплен опыт применения методов нейровизуализации для оценки структурных и функциональных изменений вследствие ИИ, которые дают количественную и визуальную информацию о поражении головного мозга и его адаптации к повреждению [5].

Компьютерная томография и магнитно-резонансная томография (МРТ) в острой фазе инсульта позволяют выявить наличие кровоизлияния, исключить другие внутричерепные патологии, оценить размеры инфаркта, состояние пенумбры, наличие сопутствующих поражений белого вещества. Объем и локализация инфаркта, определенные с помощью МРТ, рассматриваются как значимые предикторы функционального исхода [6].

Нейровизуализация регистрирует функциональные процессы, происходящие в мозге после инсульта. Функ-

циональная МРТ (фМРТ) определяет изменения кровотока, связанные с нейронной активностью, позволяет картировать области мозга, вовлеченные в выполнение двигательных и когнитивных задач. Посредством диффузионно-тензорной визуализации можно оценить состояние трактов белого вещества, нарушение целостности которых (особенно кортикоспинального) ассоциируется с худшим моторным восстановлением. Полученные с помощью структурной МРТ и диффузионно-тензорной визуализации данные о морфологических изменениях предопределяют прогноз восстановления пациента. Установлено, что повышение индекса фракционной анизотропии в проводящих путях более 0,15 связано с худшим двигательным восстановлением. Имеются данные о возможности применения фМРТ для прогнозирования функциональных исходов ИИ [7].

В первые сутки после инсульта фМРТ фиксирует нарушение паттернов активности мозга: повышение активности контралатеральной моторной коры и снижение активности субкортикальных структур. Это приводит к вовлечению более обширной области мозга в реализацию движения, включая контралатеральную моторную кору [8–14]. В ранний восстановительный период нормализуется межполушарное взаимодействие и снижается выраженность асимметрии за счет уменьшения активности интактного и повышения активности пораженного полушария головного мозга, что коррелирует с улучшением двигательных функций. Происходит реинтеграция пораженного полушария в исходные нейронные сети для тех случаев, когда это возможно. Реорганизация коннектомов подтверждается изменениями в паттернах активации головного мозга [15–20]. В одном пилотном исследовании было показано, что у пациентов с исходно повышенной активацией премоторной коры пораженного полушария отмечалось более существенное улучшение функции верхней конечности в отдаленный период инсульта [21].

В поздний восстановительный период реорганизация нейронных сетей завершается, активность нейропластичности снижается. Высокий уровень восстановления функций связан с активацией моторной и премоторной коры пораженного полушария, в то время как активация атипичных зон (червь или базальные ядра) коррелирует с низкой эффективностью медицинской реабилитации (МР) [22, 23].

Функциональная МРТ проводится с использованием двух различных парадигм: resting-state фМРТ (rs-фМРТ) — данные получают в покое, task-based фМРТ (tb-фМРТ) — испытуемые выполняют двигательные или когнитивные задачи. Проведенные исследования подтвердили возможность применения rs-фМРТ с анализом функциональных сетей в качестве предиктора функционального восстановления для персонализации МР [24]. Task-based фМРТ также демонстрирует некоторую эффективность в прогнозировании функциональных исходов [25–28]. Таким образом, фМРТ может рассматриваться как метод оценки динамики реабилитационного процесса и эффективности МР.

ЦЕЛЬ

Определение возможности использования фМРТ в качестве предиктора функционального восстановления после перенесенного ИИ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось на базе ГАУЗ МНПЦ МРВСМ им. С.И. Спасокукоцкого ДЗМ. В НИИ Скорой помощи им. Н.В. Склифосовского проводилась фМРТ на магнитно-резонансном томографе Signa HDxt 3.0T (GE Healthcare, США). Протокол исследования зарегистрирован на clinicaltrial.gov: ClinicalTrials.gov ID: NCT05944666.

В исследование включены пациенты в возрасте от 40 до 80 лет с установленным диагнозом ИИ в острый и ранний восстановительный периоды с наличием гемипареза различной степени выраженности. Все пациенты прошли базисный курс МР в течение 12 дней, включавший в себя кинезиотерапию (массаж, лечебная гимнастика, механотерапия) и физиотерапевтические процедуры (магнитотерапия). Все участники подписали информированное согласие.

Критериями невключения в исследование являлись: очаговое поражение головного мозга иной этиологии; выраженные когнитивные нарушения (менее 20 баллов по MoCA); клинически выраженные аффективные расстройства (11 баллов и более по HADS); сенсорная и грубая моторная афазия; эпилепсия; наличие электронных стимуляторов, металлических имплантатов в области головы. Используемые для оценки неврологического статуса шкалы представлены в таблице 1.

Клинико-неврологическое исследование и оценка по шкалам выполнялись исходно (T0) и по завершении курса МР (T1).

Всем пациентам была проведена анатомическая (T1w) и функциональная (BOLD) МРТ головного мозга с выполнением простой двигательной задачи для каждой конечности (task-based). Каждое исследование имело блоковый характер и включало в себя 5 блоков покоя и 4 блока задачи по 30 сек на каждый, общей длительностью одной серии фМРТ 270 сек. Было получено 90 объемов, преобразованных в формат 4D. Полученные результаты были сконвертированы в формат NIFTI и организованы в наборы данных согласно стандарту BIDS (Brain Imaging Data Structure), который представляет собой открытый формат для организации данных нейровизуализации. BIDS имеет строгую иерархическую структуру каталогов, правила наименования файлов и форматы хранения метаданных, что обеспечивает единообразие данных при постобработке [29, 30].

Данные для пациентов с поражением правого полушария были «отзеркалены» для нивелирования межполушарной асимметрии и корректного анализа. Таким образом, поражение всегда было локализовано в левом полушарии. В дальнейшем полученные значения были обработаны с использованием протокола fMRIPrep (версия 23.0.2), разработанного Оскаром Эстебана с соавт. для стандартизации и автоматизации предобработки данных фМРТ. Он объединяет в конвейер алгоритмы из пакетов FSL, FreeSurfer, AFNI и ANTs, что обеспечивает высокую воспроизводимость результатов [31–33].

Предварительная обработка анатомического изображения включала следующие этапы: коррекцию интенсивности с использованием N4BiasFieldCorrection из программного пакета ANTs 2.3.3 для дальнейшего использования в качестве референсного изображения, удаление изображений черепа и мягких тканей с применением antsBrainExtraction.sh через библиотеку NiPype, сегментацию головного мозга, реконструк-

Таблица 1. Шкалы и опросники, используемые в исследовании
Table 1. Scales and questionnaires used in the study

Исследуемая функция / Function under study	Методика обследования / Examination methodology
Функция мышечной силы / Muscle strength function	Шкала для оценки мышечной силы комитета медицинских исследований, MRCS / Medical Research Council Scale, MRCS
Функция мышечного тонуса / Muscle tone function	Шкала спастичности Эшворта, MAS / Modified Ashworth Scale, MAS
Состояние двигательной функции верхней конечности / Condition of the motor function of the upper limb	Шкала Фугл-Мейер для верхней конечностей, FMA-UE / The Fugl-Meyer Assessment for upper extremity, FMA-UE Тест моторной активности руки, ARAT / The Action Research Arm Test, ARAT Тест с колышками и девятью отверстиями, NHPT / Nine-hole peg test, NHPT Тест для руки Френчай, FAT / The Frenchay Arm Test, FAT Тест «Кубики в коробке», BBT / Box and Block Test, BBT
Функция ходьбы / Mobility	Тест на прохождение 10 метров (м/сек) / 10 Metre Walk Test (m/sec) Индекс мобильности Ривермид, RMI / Rivermead Mobility Index, RMI
Функция равновесия / Balance	Шкала Тинетти, POMA / Tinetti scale, Performance-Oriented Mobility Assessment, POMA Шкала равновесия Берг, BBS / The Berg Balance Scale, BBS Тест на время «Встань и иди», TUG / Timed Up and Go test, TUG
Функциональная независимость / Functional independence	Шкала Бартел, BI / Barthel ADL Index: activities of daily living, BI Шкала реабилитационной маршрутизации, ШРМ / Rehabilitation routing scale, RRS
Домены МКФ / ICF Domains	b7301 — сила одной конечности (отдельно для верхней и для нижней) / b7301 — power of muscles of one limb (separate for upper and lower) b760 — контроль произвольных двигательных функций / b760 — control of voluntary movement functions b770 — стереотип походки / b770 — gait pattern d440 — использование точных движений кисти / d440 — fine hand use d598 — самообслуживание / d598 — self-care

Примечание: МКФ — международная классификация функционирования, ограничений жизнедеятельности и здоровья.
Note: ICF — International Classification of Functioning, Disability and Health.

цию коры с использованием FreeSurfer 7.3.2 и ANTs. В последующем была проведена нормализация полученных изображений в стандартное пространство MNI152NLin2009cAsym (использовался шаблон ICBM 152 Nonlinear Asymmetrical template version 2009c).

Каждая серия функциональных изображений обрабатывалась отдельно. Сначала, используя методологию fMRIprep, формировался опорный объем и его версии без черепа. Далее с помощью mcflirt (FSL) вычислялись параметры движения головы (матрицы преобразования) по отношению к опорному объему. Затем применялась коррекция временных задержек срезов (slice-timing correction) с помощью 3dTshift (AFNI). Трансформированные изображения возвращались в исходное пространство. После этого проводилась корегистрация с анатомическим изображением (bregister, FreeSurfer 7.3.2). Для каждой функциональной серии определялись артефакты от движения головы и физиологические регрессоры для уменьшения шума (tCompCor, aCompCor). Полученные данные были нормализованы в стандартное пространство MNI152NLin2009cAsym. В завершении, после исключения невалидных объемов и пространственного сглаживания (Гауссово сглаживание), применялся алгоритм ICA-AROMA для удаления шумов.

Постобработка и анализ результатов, а также визуализация проводились с использованием программных

пакетов Nilearn и FSL. Статистический анализ проводился с использованием программных пакетов Microsoft Office (Microsoft, США) и программы StatTech v. 4.8.0 (разработчик — ООО «Статтех», Россия). Количественные показатели оценивались на предмет соответствия нормальному распределению с помощью критерия Шапиро — Уилка. При сравнении количественных показателей, распределение которых отличалось от нормального, в двух связанных группах использовался U-критерий Вилкоксона. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В исследование включено 34 человека, перенесших ИИ супратенториальной локализации с постинсультным геми- или монопарезом в 2–4 балла по шкале MRC, мышечным тонусом по шкале MAS от 1 до 3 баллов. Медиана давности инсульта составила 17,0 [13,25; 60,75] дней. Средний возраст участников — 62,0 [58,0; 65,0] года.

Проведен сравнительный анализ динамики клинических показателей исходно (T0) и непосредственно после завершения МР (T1). Выявлена статистически значимая динамика по шкалам Тинетти, NHPT, BBT, BBS, FMA-UE, RMI, TUG, ARAT и FAT, BI ($p < 0,05$, критерий Вилкоксона) (табл. 2).

Таблица 2. Динамика клинических показателей пациентов, перенесших ишемический инсульт
Table 2. Dynamics of clinical indicators in patients after ischemic stroke

Шкала / Scale	Визиты / Visits		T0			T1			p
			Медиана / Median	Q1	Q3	Медиана / Median	Q1	Q3	
Шкала Тинетти, равновесие, балл / Tinetti scale, balance, score			14,00	10,00	15,75	15,00	12,25	16,00	< 0,01*
Шкала Тинетти, ходьба, балл / Tinetti scale, walking, score			9,50	9,00	11,00	11,00	11,00	12,00	< 0,01*
Шкала Тинетти, суммарный балл / Tinetti scale, total score			22,50	18,00	26,00	26,00	24,00	28,00	< 0,01*
TUG, сек / TUG, sec			11,00	9,00	15,75	9,00	8,00	15,75	< 0,01*
NHPT, сек / NHPT, sec			57,50	24,00	86,75	41,00	18,25	66,50	< 0,01*
BBT, балл / BBT, score			27,50	19,25	34,00	35,00	27,25	45,75	< 0,01*
BBS, балл / BBS, score			49,00	42,00	52,75	54,00	48,00	56,00	< 0,01*
RMI, балл / RMI, score			10,00	8,00	11,00	12,00	10,00	14,00	< 0,01*
FMA-UE, балл / FMA-UE, score			45,00	36,25	51,00	60,00	45,50	63,00	< 0,01*

Примечание: TUG — тест на время «Встань и иди»; NHPT — тест с колышками и девятью отверстиями; BBT — тест «Кубики в коробке»; BBS — шкала равновесия Берг; RMI — индекс мобильности Ривермид; FMA-UE — шкала Фугл-Мейер для верхней конечностей; T0 — исходный показатель; T1 — показатель после завершения медицинской реабилитации; * — $p < 0,05$ — значимость различий по сравнению с исходными показателями.

Note: TUG — Timed Up and Go test; NHPT — nine-hole peg test; BBT — Box and Block Test; BBS — The Berg Balance Scale; RMI — Rivermead Mobility Index; FMA-UE — The Fugl-Meyer Assessment for upper extremity; T0 — baseline indicator; T1 — indicator after completion of medical rehabilitation; * — $p < 0.05$ — statistically significant differences compared to baseline values.

Динамика показателей мобильности, ходьбы и равновесия

Продemonстрировано статистически значимая положительная динамика RMI с 10 [8; 11] до 12 [10; 14] единиц ($p < 0,01$). Медиана общего балла по шкале Тинетти увеличилась с 22,5 [18; 26] до 26 [24; 28] ($p < 0,01$), при этом изменения в подшкалах были сопоставимы, без различий в отношении равновесия или ходьбы. Тест TUG выявил схожую тенденцию: среднее время, затраченное на прохождение дистанции, уменьшилось с 11 [9;15,75] до 9 [8;15,75] сек ($p < 0,01$). Отмечалось повышение среднего балла по BBS после курса МР с 49 [42; 52,75] до 54 [48; 56] ($p < 0,01$).

Функция верхней конечности

По данным NHPT среднее время выполнения теста уменьшилось с 57,5 [24,0; 86,75] до 41 [18,25; 66,5] сек ($p < 0,01$) (рис. 1). Средний балл BBT возрос с 27,5 [19,25; 34] до 35 [27,25; 45,75] кубиков ($p < 0,01$) (рис. 2). Оценка по FMA-UE продемонстрровала увеличение среднего балла с 45 [36,25; 51] до 60 [45,5; 63] ($p < 0,01$). Отмечено статистически значимое улучшение по MRCS в пораженных конечностях в среднем на 0,5 балла верхних и нижних конечностей ($p < 0,01$).

Анализ динамики значений определителя выявил статистически значимое улучшение в следующих доменах МКФ: b7301 — сила одной конечности (отдельно для верхней и для нижней), b760 — контроль произвольных двигательных функций, b770 — стереотип походки, d440 — использование точных движений кисти, d598 — самообслуживание. Это свидетельствовало об уменьшении выраженности функциональных нарушений (рис. 3–5).

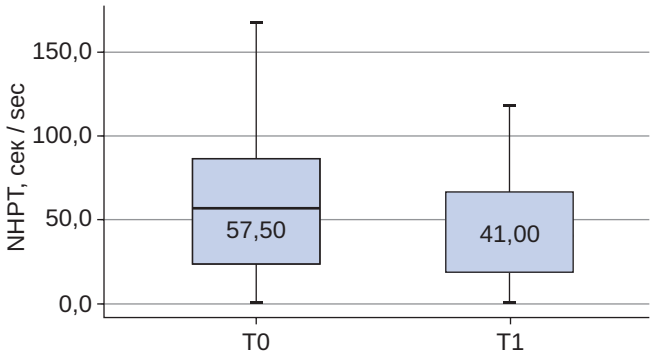


Рис. 1. Анализ динамики NHPT (nine-hole peg test, тест с колышками и девятью отверстиями)

Fig. 1. Analysis of NHPT (Nine-Hole Peg Test) dynamics

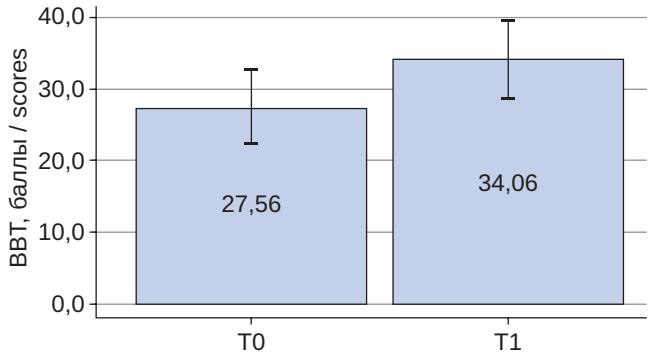


Рис.2. Анализ динамики BBT (Box and Block Test, тест «Кубики в коробке»)

Fig.2. Analysis of BBT (Box and Block Test) dynamics

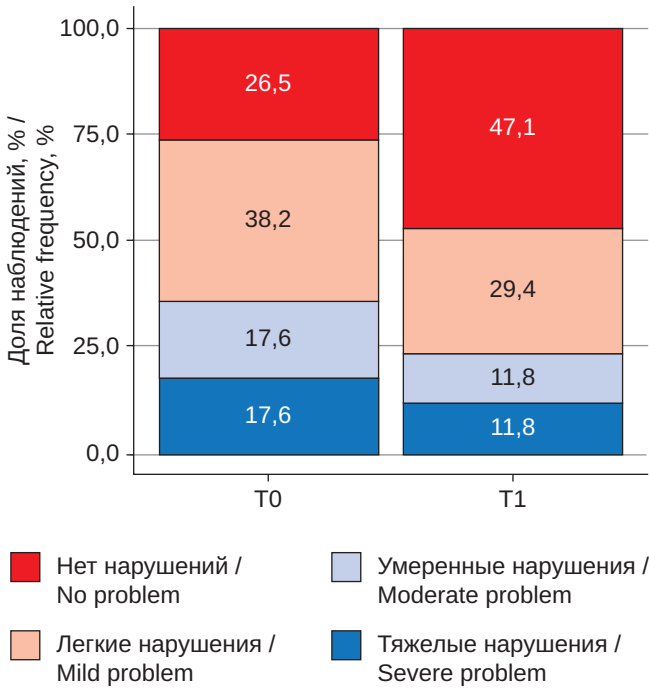


Рис. 3. Анализ динамики b760 — контроль произвольных двигательных функций
Fig. 3. Analysis of b760 — Control of voluntary movement functions

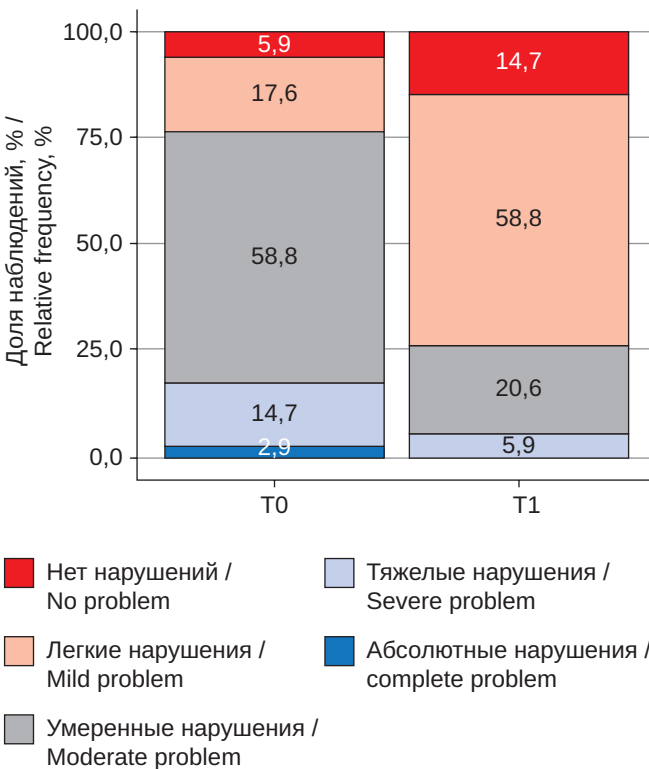


Рис. 4. Анализ динамики b770 — стереотип походки
Fig. 4. Analysis of b770 — Gait pattern

На основании данных фМРТ, зафиксированных в процессе выполнения двигательного задания парализованной конечностью, были сформированы две группы больных (по 17 человек в каждой): 1 группа — с высокой степенью активации первичной моторной коры (ПМК) пораженного полушария, 2 группа — с низкой степенью ее активации. Группы были сопоставимы по полу, возрасту и выраженности клинических проявле-

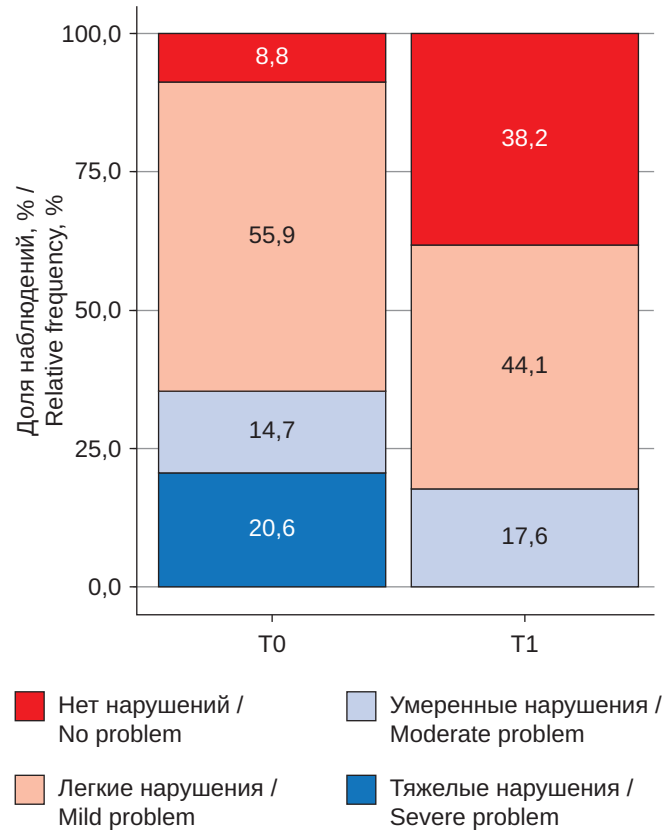


Рис. 5. Анализ динамики d598 — самообслуживание
Fig. 5. Analysis of d598 — Self-care

ний ИИ. Анализ активации различных участков головного мозга выявил следующие корреляции:

1. У пациентов с низкой степенью активации ПМК пораженного полушария при выполнении движений паретичной рукой был выявлен кластер активации в ипсилатеральном полушарии мозжечка. Дополнительно была выявлена более высокая активность во фронтальных областях при выполнении задания паретичной конечностью (рис. 6).

2. Локализация зон активации ПМК нижней конечности не изменилась, однако были выявлены дополнительные зоны активации фронтальных областей (рис. 7).

3. Анализ активации интактного полушария при выполнении движений здоровыми конечностями достоверных различий в локализации зон активации не показал (рис. 8).

Других статистически значимых различий между группами не выявлено (табл. 3).

Интегральный показатель силы верхней конечности (MRCS) в группе с низкой активацией вырос с 3,67 [2,78; 4,00] до 4,11 [3,22; 4,78] баллов ($p < 0,001$), в группе с высокой активацией — с 4 [3,33; 4,33] до 4,44 [4,00; 4,78] баллов ($p < 0,001$). Интегральный показатель MRCS нижней конечности в группе с низкой активацией вырос с 4 [3,00; 4,67] до 4,56 [3,56; 5,00] баллов ($p = 0,001$), в группе с высокой активацией — с 4 [3,67; 4,22] до 4,44 [4,00; 5,00] баллов ($p = 0,003$). Значимой динамики по шкале MAS отмечено не было ни в одной из групп. Достоверных различий в динамике восстановления у пациентов с высокой и низкой степенью активации не выявлено (табл. 3), тем не менее отмечалась тенденция к более высоким результатам в группе с высокой активацией пораженного полушария ($p = 0,056$).

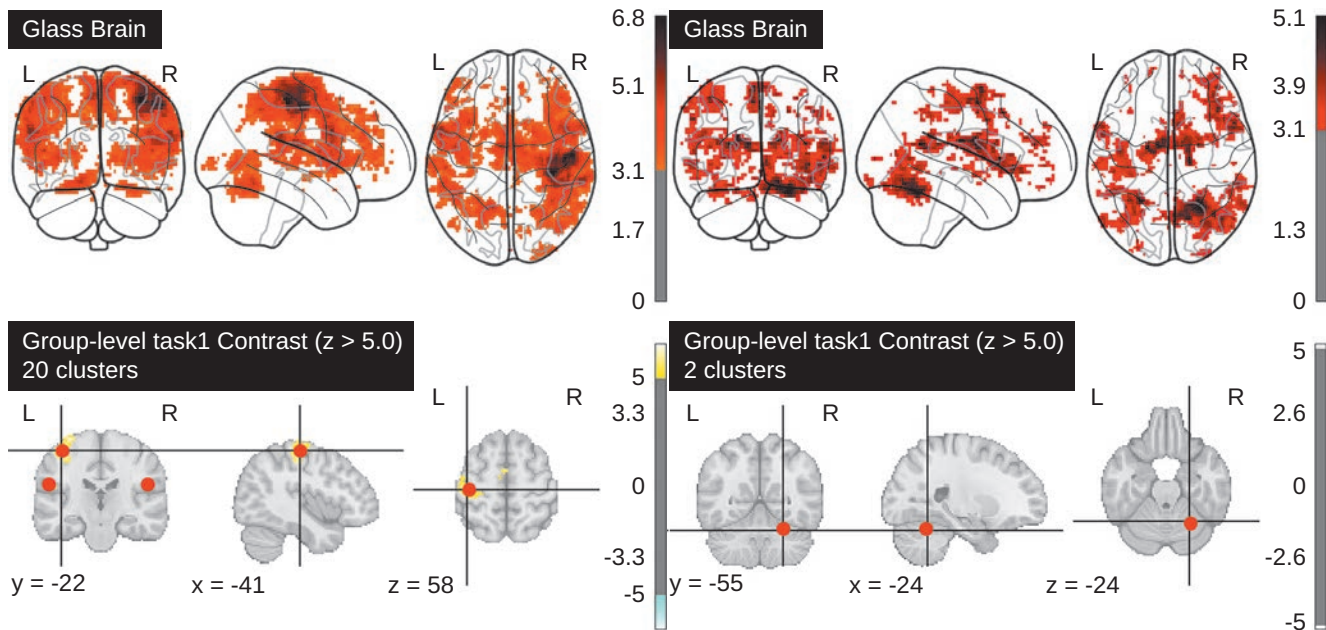


Рис. 6. Изменение активности различных областей мозга при выполнении движения паретичной верхней конечностью (слева — пациенты с высоким уровнем активации, справа — с низким)

Fig. 6. Changes in brain region activation during movement of the paretic upper limb (left — patients with high activation level, right — with low activation level)

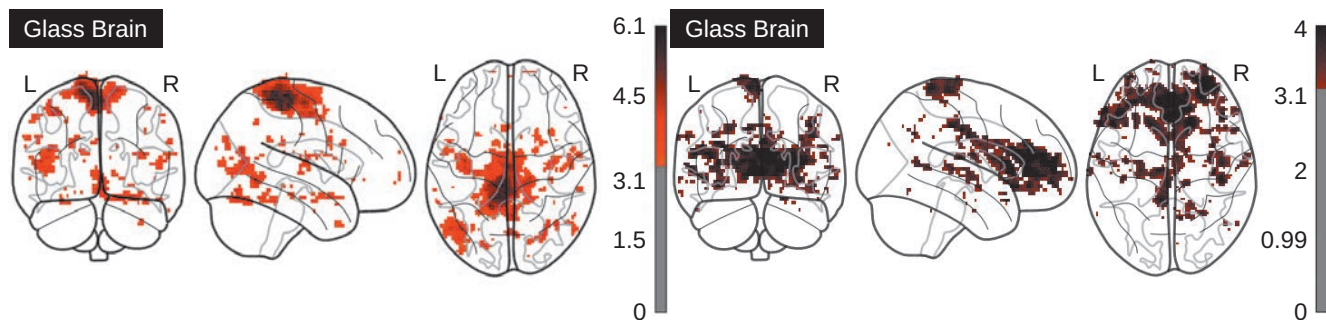


Рис. 7. Активация первичной моторной коры пораженного полушария, представительства нижней конечности (слева — пациенты с высоким уровнем активации, справа — с низким)

Fig. 7. Activation of the primary motor cortex in the affected hemisphere representing the lower limb (left — patients with high activation level, right — with low activation level)

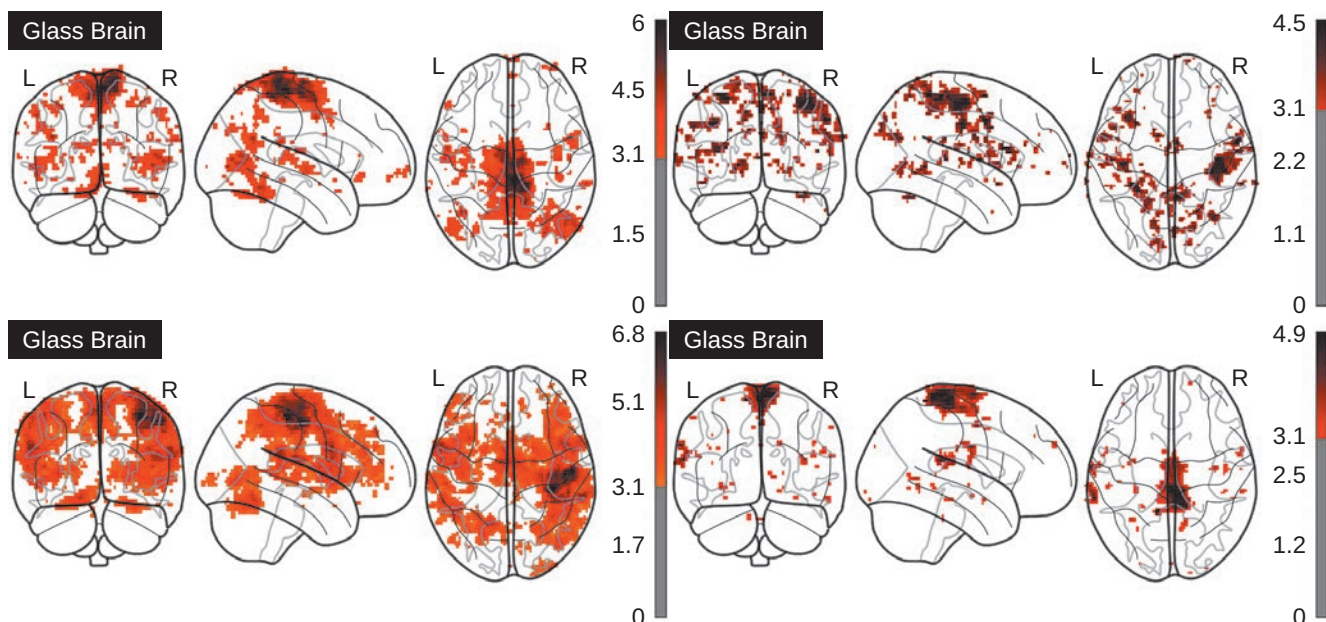


Рис. 8. Активация первичной моторной коры intactного полушария, представительства верхней (сверху) и нижней (снизу) конечности (слева — пациенты с высоким уровнем активации, справа — с низким)

Fig. 8. Activation of the primary motor cortex in the intact hemisphere representing the upper (top) and lower (bottom) limb (left — patients with high activation level, right — with low activation level)

Таблица 3. Динамика клинических показателей в группах пациентов с низкой и высокой активацией пораженного полушария

Table 3. Dynamics of clinical indicators in patient groups with low and high activation of the affected hemisphere

Группы пациентов / patient groups	Пациенты группы низкой активации / Patients of the low activation group (n = 17)			Пациенты группы высокой активации / Patients of the high activation group (n = 17)		
	Визиты / Visits		p	Визиты / Visits		p
	T0	T1		T0	T1	
Шкала Тинетти, равновесие, балл / Tinetti scale, balance score	14 [9; 15]	15 [12; 16]	0,002	13 [12; 16]	15 [13; 16]	0,027
Шкала Тинетти, ходьба, балл / Tinetti scale, walking score	10 [7; 11]	11 [11; 12]	0,002	9 [9; 11]	11 [11; 12]	0,014
Шкала Тинетти, суммарный балл / Tinetti scale, total score	25 [16; 26]	26 [23; 28]	0,001	22 [21; 25]	26 [24; 28]	0,001
TUG-тест, сек / TUG, sec	10 [8; 20]	9 [8; 16]	0,003	12 [10; 15]	9 [8; 12]	0,001
NHPT, сек / NHPT, sec	45 [24; 66]	41 [18; 58]	0,001	58 [21; 118]	41 [19; 70]	0,001
BBT, баллы / BBT, score	26,65 ± 14,30	32,65 ± 15,60	0,001	28,47 ± 15,51	35,47 ± 16,23	0,001
BBS, баллы / BBS, score	51 [41; 53]	54 [48; 56]	0,001	47 [42; 51]	52 [48; 56]	0,001
RMI, балл / RMI, score	10 [8; 11]	12 [9; 14]	0,001	10 [8; 11]	12 [10; 14]	0,001
FMA-UE, балл / FMA-UE, score	45 [29; 47]	58 [44; 62]	0,001	48 [37; 52]	61 [49; 63]	0,001

Анализ статистических данных выявил отличия в активности отдельных зон головного мозга при выполнении моторного задания. Увеличение активности в пораженном полушарии во время выполнения простого задания паретичной конечностью демонстрировало тенденцию к лучшему восстановлению функции, хотя и не достигало статистической значимости ($p = 0,056$), что подтверждается данными литературы [15, 16].

Значимой корреляции между степенью активации интактного полушария при выполнении задач здоровыми конечностями и динамикой восстановления обнаружено не было. Поскольку в исследование были включены пациенты в острый и ранний восстановительный периоды ИИ, возможно, у части пациентов еще не произошел процесс реорганизации нейронных сетей. Функциональные исходы в краткосрочной перспективе достоверно между группами не различались, даже у пациентов с явной межполушарной асимметрией. В то же время нами было выявлено, что у пациентов с низким уровнем активации ПМК представительства ВК верхней конечности формируется кластер активации в контралатеральном полушарии мозжечка, что, вероятно, является компенсаторным механизмом и указывает на активацию следующего звена исходных нейронных сетей. Эти данные также согласуются с данными литературы [22, 23].

При выполнении задачи у всех пациентов в той или иной степени происходила активация контралатерального поражения полушария, однако у пациентов с низкой степенью активации ПМК эта тенденция была менее выражена. Полученные нами данные согласуются с предыдущими исследованиями и показывают основные механизмы реорганизации функциональных сетей головного мозга.

Одновременно у значительной части пациентов, особенно в задачах на движение нижней конечности, происходила активация фронтальной коры, что может свидетельствовать о необходимости вовлечения дополнительных участков мозга в процесс ходьбы, во многом автоматизированный у здоровых лиц.

Ограничения исследования связаны с небольшим размером выборки (34 пациента) и кратким периодом наблюдения за пациентами, что необходимо учитывать при интерпретации полученных результатов. Небольшая выборка, безусловно, снижает статистическую мощность исследования. Кратковременность наблюдения не позволяет судить о долгосрочных эффектах реабилитации и не всегда отражает реальную динамику заболевания и активацию зон коры головного мозга.

С учетом обозначенных тенденций для определения роли task-based фМРТ в качестве прогностического маркера восстановления после ИИ требуются дополнительные исследования. Открытым также остается вопрос о сроках выполнения исследования для оптимальной оценки реабилитационного потенциала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогнозирование функциональных исходов при инсульте — сложная и важная задача, требующая комплексного подхода. Использование шкал и моделей прогнозирования может стандартизировать процесс оценки и помочь врачам в принятии клинических решений. Ранняя и интенсивная реабилитация играет важную роль в улучшении функциональных исходов и качества жизни пациентов, перенесших инсульт. Многообещающим инструментом для прогнозирования функциональных исходов при инсульте является фМРТ.

Определение количественных изменений фМРТ, имеющих тесную корреляцию с клиническими данными, позволит стратифицировать больных на группы по степени вероятного восстановления, разработать модели пациентов и алгоритмы их МР.

На основании результатов настоящего исследования нельзя с уверенностью утверждать, что фМРТ является надежным инструментом для прогнозирования функционального восстановления. Будущие исследования,

вероятно, повысят эффективность применения фМРТ в клинической практике, что в свою очередь приведет к более точным прогнозам и оптимизации реабилитационных стратегий для пациентов, перенесших инсульт. В дальнейшем планируется оценить динамику по шкалам под воздействием реабилитационных мероприятий в зависимости от инициальной активации коры головного мозга, а также оценить динамику активации в разные периоды после ИИ.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Погонченкова Ирэна Владимировна, доктор медицинских наук, доцент, директор, Московский научно-практический центр медицинской реабилитации, восстановительной и спортивной медицины им С.И. Спасокукоцкого Департамента здравоохранения города Москвы.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5123-5991>

Костенко Елена Владимировна, доктор медицинских наук, профессор, заместитель директора по научной работе, Московский научно-практический центр медицинской реабилитации, восстановительной и спортивной медицины им С.И. Спасокукоцкого Департамента здравоохранения города Москвы; невролог, профессор кафедры неврологии, нейрохирургии и медицинской генетики, Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0629-9659>

Кашежев Алим Гумарович, кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, Московский научно-практический центр медицинской реабилитации, восстановительной и спортивной медицины им С.И. Спасокукоцкого Департамента здравоохранения города Москвы.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7483-1796>

Петрова Людмила Владимировна, кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, невролог, заведующий отделом медицинской реабилитации, Московский научно-практический центр медицинской реабилитации, восстановительной и спортивной медицины им С.И. Спасокукоцкого Департамента здравоохранения города Москвы.

E-mail: ludmila.v.petrova@yandex.ru, nauka-org@mail.ru;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0353-553X>

Вклад авторов. Все авторы подтверждают свое авторство в соответствии с международными критериями ICMJE (все авторы внесли значительный вклад в концепцию, дизайн исследования и подготовку статьи, прочитали и одобрили окончательный вариант до публикации). Наибольший вклад распределен следующим образом: Погонченкова И.В. — руководство проектом, проверка и редактирование рукописи, Костенко Е.В. — руководство проектом, методология, анализ данных, проверка и редактирование рукописи; Кашежев А.Г. — научное обоснование, верификация данных, анализ данных, проверка и редактирование рукописи; Петрова Л.В. — написание черновика рукописи, проверка и редактирование рукописи.

Источники финансирования. Грант Правительства г. Москвы № 1503-7/23.

Конфликт интересов. Костенко Е.В. — член редакционной коллегии журнала «Вестник восстановительной медицины». Остальные авторы заявляют отсутствие конфликта интересов.

Этическое утверждение. Авторы заявляют, что все процедуры, использованные в данной статье, соответствуют этическим стандартам учреждений, проводивших исследование, и соответствуют Хельсинкской декларации в редакции 2013 г. Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом ГАУЗ «Московский научно-практический центр медицинской реабилитации, восстановительной и спортивной медицины им. С.И. Спасокукоцкого Департамента здравоохранения города Москвы» (г. Москва, Россия) (Протокол № 2 от 19.04.2023).

Доступ к данным. Данные, подтверждающие выводы этого исследования, можно получить по обоснованному запросу у корреспондирующего автора.

ADDITIONAL INFORMATION

Irena V. Pogonchenkova, D.Sc. (Med.), Director, S.I. Spasokukotsky Moscow Centre for Research and Practice in Medical Rehabilitation, Restorative and Sports Medicine of Moscow Healthcare Department.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5123-5991>

Elena V. Kostenko, D.Sc. (Med.), Professor, Deputy Director for Scientific Work, S.I. Spasokukotsky Moscow Centre for Research and Practice in Medical Rehabilitation, Restorative and Sports Medicine of Moscow Healthcare Department; Neurologist, Professor at the Department of Neurology, Neurosurgery and Medical Genetics, Pirogov Russian National Research Medical University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0629-9659>

Alim G. Kashezhev, Ph.D. (Med.), Senior Research Assistant, S.I. Spasokukotsky Moscow Centre for Research and Practice in Medical Rehabilitation, Restorative and Sports Medicine of Moscow Healthcare Department.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7483-1796>

Liudmila V. Petrova, Ph.D. (Med.), Head of Department of Medical Rehabilitation, S.I. Spasokukotsky Moscow Centre for Research and Practice in Medical Rehabilitation, Restorative and Sports Medicine of Moscow Healthcare Department.

E-mail: ludmila.v.petrova@yandex.ru, nauka-org@mail.ru;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0353-553X>

Author Contributions. All authors confirm their authorship according to the international ICMJE criteria (all authors contributed significantly to the conception, study design and preparation of the article, read and approved the final version before publication). Special Contributions: Pogonchenkova I.V. — project administration; writing — review & editing; Kostenko E.V. — project administration; methodology; writing — review & editing; Kashezhev A.G. — conceptualization; formal analysis; validation; writing — review & editing; Petrova L.V. — writing — original draft.

Funding. This study was performed in accordance with the Moscow Government Grant No. 1503-7/23.

Disclosure. Kostenko E.V. — Member of the Editorial Board of Bulletin of Rehabilitation Medicine Journal. Other authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Ethics Approval. The authors declare that all procedures used in this article are in accordance with the ethical standards of the institutions that conducted the study and are consistent

with the 2013 Declaration of Helsinki. The study was approved by the Local Ethics Committee of the Moscow Centre for Research and Practice in Medical Rehabilitation, Restorative and Sports Medicine of Moscow Healthcare Department (Moscow, Russia) (Protocol No. 2 dated 19.04.2023).

Data Access Statement. The data that support the findings of this study are available on request from the corresponding author.

Список литературы / References

1. World Stroke Organization. Global Stroke Fact Sheet 2022. Available at: <https://www.dropbox.com/scl/fi/tiqrhvs06s58yamxa053x/World-Stroke-Organization-WSO-Global-Stroke-Fact-Sheet-2022.pdf?rlkey=pbndaqvaadzpij099dwe6psx5&e=1&dl=0> (Accessed 14.04.2025).
2. GBD 2021 Stroke Risk Factor Collaborators. Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990–2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *Lancet Neurol.* 2024; 23(10): 973–1003. [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(24\)00369-7](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(24)00369-7)
3. Martin S.S., Aday A.W., Almarzooq Z.I., et al. American Heart Association Council on Epidemiology and Prevention Statistics Committee; Stroke Statistics Subcommittee. 2024 heart disease and stroke statistics: a report of US and global data from the American Heart Association. *Circulation.* 2024; 149: e347–913. <https://doi.org/10.1161/cir.0000000000001209>
4. Игнатьева В.И., Вознюк И.А., Шамалов Н.А. и др. Социально-экономическое бремя инсульта в Российской Федерации. Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. Спецвыпуски. 2023; 123(8–2): 5–15. <https://doi.org/10.17116/jnevro20231230825> [Ignatyeva V.I., Voznyuk I.A., Shamalov N.A., et al. Socio-economic burden of stroke in the Russian Federation. *Journal of Neurology and Psychiatry.* 2023; 123(8–2): 5–15. <https://doi.org/10.17116/jnevro20231230825> (In Russ.).]
5. Lu W.Z., Lin H.A., Bai C.H., Lin S.F. Posterior circulation acute stroke prognosis early CT scores in predicting functional outcomes: A meta-analysis. *PLoS One.* 2021; 16(2): e0246906. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246906>
6. Liu Y., Yu Y., Ouyang J., et al. Functional Outcome Prediction in Acute Ischemic Stroke Using a Fused Imaging and Clinical Deep Learning Model. *Stroke.* 2023; 54(9): 2316–2327. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.123.044072>
7. Gaviria E., Muñoz-Moreno E., Pérez-Delgado M.M., et al. Neuroimaging biomarkers for predicting stroke outcomes: a systematic review. *Health Sci Rep.* 2024; 7(7): e2221. <https://doi.org/10.1002/hsr2.2221>
8. Crofts A., Kelly M.E., Gibson C.L. Imaging functional recovery following ischemic stroke: clinical and preclinical fMRI studies. *J Neuroimaging.* 2020; 30(1): 5–14. <https://doi.org/10.1111/jon.12668>
9. Favre I., Zeffiro T.A., Detante O., et al. Upper limb recovery after stroke is associated with ipsilesional primary motor cortical activity: a meta-analysis. *Stroke.* 2014; 45(4): 1077–1083. <https://doi.org/10.1161/strokeaha.113.003168>
10. Zhang Z. Resting-state functional abnormalities in ischemic stroke: a meta-analysis of fMRI studies. *Brain Imaging Behav.* 2024; 18(6): 1569–1581. <https://doi.org/10.1007/s11682-024-00919-1>
11. Chi N.F., Ku H.L., Chen D.Y., et al. Cerebral motor functional connectivity at the acute stage: an outcome predictor of ischemic stroke. *Sci Rep.* 2018; 8(1): 16803. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35192-y>
12. Puig J., Blasco G., Alberich-Bayarri A., et al. Resting-state functional connectivity MRI and outcome after acute stroke. *Stroke.* 2018; 49(10): 2353–2360. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.118.021319>
13. Du J., Yang F., Zhang Z., et al. Early functional MRI activation predicts motor outcome after ischemic stroke: a longitudinal, multimodal study. *Brain Imaging Behav.* 2018; 12(6): 1804–1813. <https://doi.org/10.1007/s11682-018-9851-y>
14. Nowak D.A., Grefkes C., Dafotakis M., et al. Effects of low-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation of the contralesional primary motor cortex on movement kinematics and neural activity in subcortical stroke. *Arch Neurol.* 2008; 65(6): 741–747. <https://doi.org/10.1001/archneur.65.6.741>
15. Rehme A.K., Eickhoff S.B., Rottschy C., et al. Activation likelihood estimation meta-analysis of motor-related neural activity after stroke. *Neuroimage.* 2012; 59(3): 2771–2782. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.10.023>
16. Tang Q., Li G., Liu T., et al. Modulation of interhemispheric activation balance in motor-related areas of stroke patients with motor recovery: systematic review and meta-analysis of fMRI studies. *Neurosci Biobehav Rev.* 2015; 57: 392–400. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.09.003>
17. Richards L.G., Stewart K.C., Woodbury M.L., et al. Movement-dependent stroke recovery: a systematic review and meta-analysis of TMS and fMRI evidence. *Neuropsychologia.* 2008; 46(1): 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.08.013>
18. Hannanu F.A., Zeffiro T.A., Lamalle L., et al. Parietal operculum and motor cortex activities predict motor recovery in moderate to severe stroke. *Neuroimage Clin.* 2017; 14: 518–529. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2017.01.023>
19. Grefkes C., Nowak D.A., Eickhoff S.B., et al. Cortical connectivity after subcortical stroke assessed with functional MRI and dynamic causal modeling. *Ann Neurol.* 2008; 63(2): 236–246. <https://doi.org/10.1002/ana.21228>
20. Zhao J., Zhang T., Xu J., et al. Functional MRI evaluation of brain function reorganization in cerebral stroke patients after constraint-induced movement therapy. *Neural Regen Res.* 2012; 7(15): 1158–1163. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5374.2012.15.006>
21. Ghaleh R., Rahimibarghani S., Shirzad N., et al. The role of baseline functional MRI as a predictor of post-stroke rehabilitation efficacy in patients with moderate to severe upper extremity dysfunction. *J Behav Brain Sci.* 2022; 12(12): 658–669. <https://doi.org/10.4236/jbbs.2022.1212039>
22. Wilson S.M., Schneck S.M. Neuroplasticity in post-stroke aphasia: a systematic review and meta-analysis of functional imaging studies of reorganization of language processing. *Neurobiol Lang.* 2021; 2(1): 22–82. https://doi.org/10.1162/nol_a_00025
23. Zhang Z. Network abnormalities in ischemic stroke: a meta-analysis of resting-state functional connectivity. *Brain Topogr.* 2025; 38(2): 19. <https://doi.org/10.1007/s10548-024-01096-6>
24. Christidi F., Orgianelis I., Merkouris E., et al. A comprehensive review on the role of resting-state functional magnetic resonance imaging in predicting post-stroke motor and sensory outcomes. *Neurology International.* 2024; 16(1): 189–201. <https://doi.org/10.3390/neurolint16010012>
25. Rehme A.K., Eickhoff S.B., Wang L.E., et al. Dynamic causal modeling of cortical activity from the acute to the chronic stage after stroke. *Neuroimage.* 2011; 55(3): 1147–1158. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.01.014>
26. Grefkes C., Ward N.S. Cortical reorganization after stroke: how much and how functional? *Brain.* 2014; 137(10): 2639–2652. <https://doi.org/10.1177/1073858413491147>
27. Calautti C., Baron J.C. Functional neuroimaging studies of motor recovery after stroke in adults: a review. *Stroke.* 2003; 34(6): 1553–1566. <https://doi.org/10.1161/01.str.0000071761.36075.a6>

28. Cheng S., Xin R., Zhao Y., et al. Evaluation of fMRI activation in post-stroke patients with movement disorders after repetitive transcranial magnetic stimulation: a scoping review. *Front Neurol.* 2023; 14: 1192545. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1192545>
29. Gorgolewski K.J., Auer T., Calhoun V.D., et al. The brain imaging data structure, a format for organizing and describing outputs of neuroimaging experiments. *Sci Data.* 2016; 3: 160044. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.44>
30. BIDS Specification. Available at: <https://bids.neuroimaging.io> (Accessed 18.03.2025).
31. Esteban O., Markiewicz C.J., Blair R.W., et al. fMRIPrep: a robust preprocessing pipeline for functional MRI. *Nat Methods.* 2019; 16(1): 111–116. <https://doi.org/10.1038/s41592-018-0235-4>
32. Esteban O., Markiewicz C.J., Finc K., et al. Analysis of task-based functional MRI data preprocessed with fMRIPrep. *bioRxiv.* 2020; 15(7): 2186–2202. <https://doi.org/10.1038/s41596-020-0327-3>
33. fMRIPrep Documentation. Available at: <https://fmriprep.org> (Accessed 18.03.2025).