

# Особенности нейроваскулярного гемодинамического ответа на активацию коры головного мозга в норме и при остром нарушении мозгового кровообращения: функциональная магнитно-резонансная томография



А. Н. Омельченко<sup>1,2</sup>, З. З. Рожкова<sup>2</sup>, Е. В. Стрепетова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

<sup>2</sup> Клиника «Борис», Киев

<sup>3</sup> Национальный медицинский университет имени А. А. Богомольца, Киев

**Цель работы** — определить особенности гемодинамического ответа у здоровых добровольцев и пациентов с острым нарушением мозгового кровообращения (ОНМК) при выполнении двигательного задания посредством анализа данных функциональной магнитно-резонансной томографии (ФМРТ).

**Материалы и методы.** Для определения участков головного мозга, подвергшихся ишемии, проведено рутинное МРТ-исследование. Локализацию очагов ишемии определяли по диффузионно-взвешенным МРТ-изображениям. Для оценки особенностей картирования двигательной коры при ишемии головного мозга методом ФМРТ исследованы три группы добровольцев: 1-я группа состояла из 18 человек без признаков неврологических расстройств, 2-я группа состояла из 3 пациентов с ОНМК, у которых очаг ишемии был расположен в белом веществе левого полушария, 3-я группа состояла из 3 пациентов с ОНМК, у которых очаг ишемии был расположен в области центральной борозды левого полушария. Во время ФМРТ пациенты выполняли движения правой рукой. Анализ данных ФМРТ проведен методом общего линейного моделирования с помощью программного обеспечения FSL.

**Результаты и обсуждение.** В результате анализа данных ФМРТ выявлена активация первичной сенсомоторной области, дополнительной моторной области и вентральной премоторной области коры контралатерального полушария головного мозга, а также ипсилатерального полушария мозжечка. У пациентов с ОНМК в ответ на выполнение двигательного задания активировались ипсилатеральная первичная сенсомоторная область, лобно-теменная и премоторная кора и оба полушария мозжечка. Обнаружено, что усредненные показатели BOLD-сигнала прогрессивно изменяются у обследованных групп: 1-я группа (1,1%) < 2-я группа (1,8%) < 3-я группа (3,6%). Обнаружена корреляция максимального изменения амплитуды BOLD-сигнала и общего объема активации головного мозга во всех группах (1-я группа —  $R = 0,84$ , 2-я группа —  $R = 0,82$ , 3-я группа —  $R = 0,86$ ).

**Выводы.** Обнаружен феномен высокой корреляции ( $R > 0,82$ ) максимального изменения BOLD-сигнала ФМРТ и общего объема активации у обследованных групп. Продемонстрировано увеличение усредненного изменения BOLD-сигнала ФМРТ у пациентов с ОНМК по сравнению со здоровыми лицами (1-я группа (1,1%) < 2-я группа (1,8%) < 3-я группа (3,6%)). Показаны компенсаторные пластические изменения в двигательной нервной сети головного мозга при ОНМК как следствие дисфункции первичных функциональных зон.

**Ключевые слова:** головной мозг, нейроваскулярный гемодинамический ответ, острое нарушение мозгового кровообращения, функциональная магнитно-резонансная томография, двигательная зона коры.

---

Стаття надійшла до редакції 17 грудня 2015 р.

Омельченко Олександр Миколайович, мол. наук. співр. Радіологічного центру Клініки «Борис»  
Тел. (44) 502-80-40. E-mail: ol.omelchenko@gmail.com

© О. М. Омельченко, З. З. Рожкова, О. В. Стрепетова, 2016

Передача нервного сигналу супроводжується збільшенням енергетических потребностей кліток. Зростає потреба в кислороді та глюкозі нейронами головного мозку, супроводжується локальним гемодинамічним відкликом, під яким розуміють збільшення локального кровотоку, об'єму та насичення крові кислородом [10]. Метод функціональної МРТ (ФМРТ), що вивчає індивідуальну гемодинамічну реакцію ділянок головного мозку на подразник, відомий в літературі як *blood oxygenation level dependent (BOLD) ФМРТ* [6]. Вперше він був запропонований у роботі S. Ogawa та співавторів [11]. У дослідженнях з використанням ФМРТ під зонами активації розуміють ті ділянки кори та підкори, зміна BOLD-сигналу в яких позитивно корелює з виконанням завдання [10].

Острове порушення мозкового кровообігу (ОНМК) знаходиться на другому місці в світі після серцево-судинних захворювань за кількістю летальних ісходів [2]. В Україні смертність від інсульту становить близько 20 випадків на 10 000 населення [2]. Інвалідизація після ОНМК становить 30% хворих [15]. Значна частота постінсультної інвалідизації свідчить про важливість точної діагностики та подальшої нейрореабілітації цієї категорії хворих [1]. Двигальні порушення є одними з найбільш поширених при ОНМК та подальшій інвалідизації пацієнтів. Своєчасна діагностика ОНМК та ділянок ураження рухової системи, а також подальше спостереження за лікуванням інсульту здатні покращити прогноз та уточнити тактику лікування. Метод ФМРТ широко застосовується в клінічних та фундаментальних дослідженнях, зокрема при вивченні інсульту [6, 9, 10, 14]. Однак використання методу BOLD ФМРТ вимагає збереження нейроваскулярного зв'язку, який при ОНМК може бути фізіологічно порушений [7]. Індивідуальні дані свідчать про те, що BOLD ФМРТ може неадекватно відображати активацію [9].

**Ціль роботи** — визначити особливості гемодинамічного відклику у здорових добровольців та пацієнтів з острим порушенням мозкового кровообігу при виконанні рухової задачі за допомогою аналізу даних функціональної магнітно-резонансної томографії.

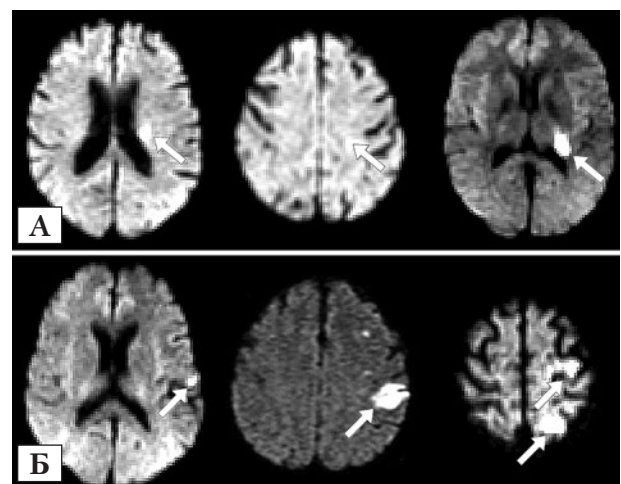
### Матеріали та методи

Методом ФМРТ з використанням МР-томографа 1.5T Signa ExciteHD (GE Healthcare, США) досліджені три групи добровольців: 1-я група складалася з 18 осіб без ознак неврологічних розладів (9 чоловіків та 9 жінок у віці від 45 до 73 років), 2-я група складалася з 3 пацієнтів з ОНМК (перші 48–72 год), у яких

очаг ішемії був розташований у білому речовині лівого півкуль (2 чоловіки та 1 жінка у віці від 55 до 67 років) (рис. 1А), 3-я група складалася з 3 пацієнтів з ОНМК, у яких кортикально-субкортикальний очаг ішемії був розташований у області центральної борозди лівого півкуль (1 чоловік та 2 жінки у віці від 49 до 62 років) (рис. 1Б). Пацієнтам проведено рутинне МРТ-дослідження в режимах T2 ВІ, T2 FLAIR, T1 ВІ та в режимі дифузійно-взвешених зображень (ДВІ) ( $b = 1000$ ). Локалізацію очагів ішемії визначали за ДВІ. Також проведено аналіз карт розподілу вимірюваних коефіцієнтів дифузії (*apparent diffusion coefficient, ADC*).

У час ФМРТ пацієнти виконували рухи правою рукою. Довжина збору даних ФМРТ становила 3 хв 24 с. Виконання рухової задачі чергувалося з періодами спокою та було сформовано в три блоки, кожен з яких тривав 28 с. Парадигма активації починалася та закінчувалася періодами спокою.

T2-взвешенні зображення отримані методом градієнтного ехо в режимі ехо-планарної томографії (GE EPI). Параметри збору даних наступні: TR/TE = 3000/71 мс, пауза після кожного сканування 1 с, FA = 90°, NEX = 1, розмір вокселя 4 × 4 × 6 мм. Для подальшого топографічного аналізу для кожного добровольця отримані T1-взвешенні структурно-анатомічні зображення головного мозку високої роздільності (імпульсна послідовність FSPGR). Параметри збору даних наступні: TR = 11,6 мс, TE = 5,2 мс, TI = 450 мс, розмір вокселів 0,98 × 1 × 1,5 мм.



**Рис. 1.** Дані МРТ в режимі ДВІ ( $b = 1000$ ) очагів ішемії, розташованих у білому речовині лівого півкуль головного мозку (А, 2-я група) та кортикально-субкортикально в області центральної борозди (Б, 3-я група)

Т а б л и ц а

## Участки активации коры головного мозга при выполнении движений

Участки головного мозга, задействованные при выполнении двигательных задач	Зона Бродмана	Взвешенные координаты кластера активации (MNI152)		
		x	Y	z
Левая пре-, постцентральная извилины, M1/S1 <sub>cont</sub>	4/3	-42,2	-18,7	52,4
Медиальная поверхность дорзальной части левой верхней лобной извилины, SMA <sub>cont</sub>	6	-4,9	-1,7	-53,9
Нижняя часть левой надкраевой извилины, PMV <sub>cont</sub>	22	-58,6	-22,3	21,7
Правое полушарие мозжечка, Cbell <sub>ips</sub>	–	16,3	-58,8	-20,1

Статистический анализ проведен методом множественной линейной регрессии как составной части общего линейного моделирования. Обработка экспериментальных данных проведена с помощью программного обеспечения FSL (FMRIB, Оксфорд, Великобритания) [4].

## Результаты

Распространенная нервная сеть в головном мозге человека, контролирующая двигательную активность, состоит из первичных и вторичных двигательных, а также высших ассоциативных участков, пирамидной и экстрапирамидной системы. Нейроны первичной моторной области осуществляют непосредственный контроль мышечной активности, премоторная и дополнительная моторная области формируют двигательные задачи, мозжечок контролирует координацию мышц и начало движения, базальные ганглии регулируют командные потоки [12]. ОНМК способно нарушить работу отдельных узлов описанной нервной сети, что ухудшает или полностью нарушает двигательный контроль [15].

В результате анализа данных ФМРТ выявили сходный для всех трех групп рисунок активации коры головного мозга. Обнаружено четыре кластера активации (таблица), которые находились в области среднего колена центральной борозды левого полушария, в участках пре- и постцентральной извилины — первичная область сенсомоторной коры (M1/S1<sub>cont</sub>), медиальной поверхности дорзальной части левой верхней лобной извилины — дополнительная моторная область премоторной коры (SMA<sub>cont</sub>), участки правого полушария мозжечка и червя мозжечка, в частности четырехугольной и полулунной долек правого полушария, участок зубчатого ядра мозжечка (Cbell<sub>ips</sub>). Также найдено участок активации в области нижней части левой надкраевой извилины — вентральная премоторная кора (PMV<sub>cont</sub>) (рис. 2). Усредненный общий объем вокселей активации составил 46,22 см<sup>3</sup> при примененном пороговом значении  $Z \geq 2,3$ .

Анализ данных ДВИ свидетельствует о снижении коэффициентов диффузии в очагах ишемии у

пациентов 2-й и 3-й группы. Значения ADC у пациентов 2-й и 3-й группы составили  $0,3 \cdot 10^{-3}$ – $0,4 \cdot 10^{-3}$  по сравнению с  $0,8 \cdot 10^{-3}$ – $1,2 \cdot 10^{-3}$  у пациентов 1-й группы.

Также у лиц 2-й и 3-й группы на ФМРТ обнаружен измененный рисунок активации головного мозга (см. рис. 2). У пациентов 2-й группы дополнительно активировалась верхняя теменная доля левого полушария головного мозга. Также у пациентов 2-й группы обнаружена билатеральная активация в мозжечке. У пациентов 3-й группы в ответ на выполнение двигательного задания активировались значительные участки коры обеих полушарий. В частности, дополнительно к описанной общей картине зоны активации были расположены в ипсилатеральной первичной сенсомоторной области, лобно-теменной и премоторной коре, мозжечке — билатерально.

Анализ изменения BOLD-сигнала в кластерах активации всех исследованных групп свидетельствует о том, что усредненная амплитуда (Аср) составляла около 1,1% (при  $Z \geq 2,3$ ). Также был сходным диапазон изменения BOLD-сигнала в трех

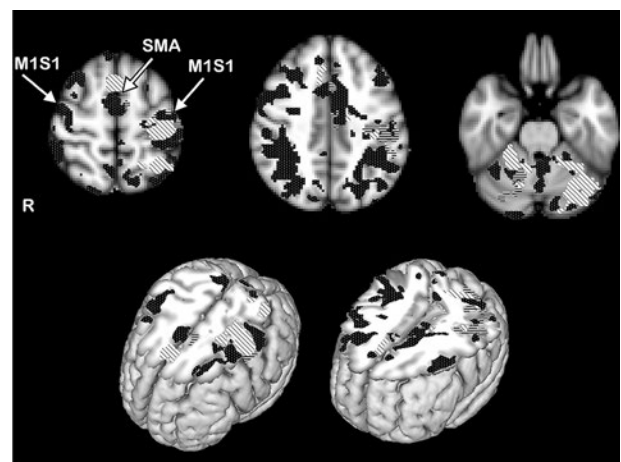
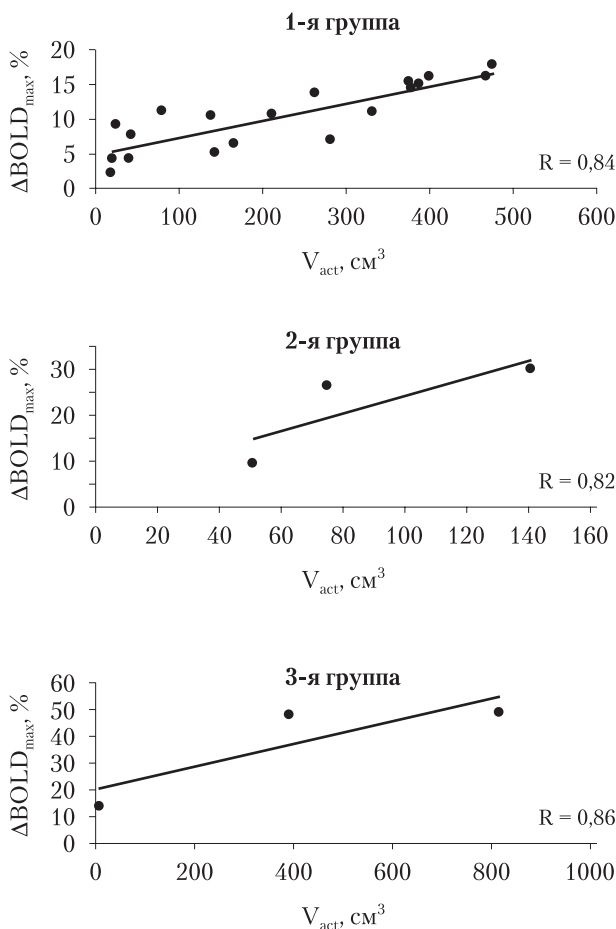


Рис. 2. Данные ФМРТ при выполнении двигательного задания в трех группах (при  $Z \geq 2,3$ ,  $p = 0,01$ ). 1-я группа (горизонтальная штриховка), 2-я группа (косая штриховка) и 3-я группа (темная пунктирная штриховка). M1S1 — первичная сенсомоторная область, SMA — дополнительная моторная область



**Рис. 3.** Корреляція значень максимального змінення амплітуди BOLD-сигналу ( $\Delta BOLD_{max}$ ) і загального об'єму активації головного мозку ( $V_{act}$ ) (при  $Z \geq 2,3$ )

исследованных группах ( $\Delta A = 0,4 \div 2,2\%$ ). Результаты анализа распределения статистических показателей по кластерам активации (при  $Z \geq 2,3$ ) трех исследованных групп свидетельствуют, что  $Z_{ср} \approx 3,3$ , а диапазон изменения  $Z$ -показателей составляет  $\Delta Z = 2,4 \div 4,8$ . Таким образом, во всех трех исследованных группах при активации наблюдается неизмеримое изменение амплитуды BOLD-сигнала.

Анализ значений максимального изменения амплитуды BOLD-сигнала и общего объема активации головного мозга (при пороговом значении статистического показателя  $Z \geq 2,3$ ) свидетельствует о значительной корреляции указанных показателей у здоровых лиц (1-я группа —  $R = 0,84$ ) и у пациентов с ОНМК (2-я группа —  $R = 0,82$ , 3-я группа  $R = 0,86$ ) (рис. 3).

В то же время усредненные показатели изменения BOLD-сигнала свидетельствуют о прогрессирующем изменении их значений в исследованных группах: 1-я группа (1,1 %) < 2-я группа (1,8 %) < 3-я группа (3,6 %).

В дальнейшем мы проанализировали динамические показатели BOLD-сигнала. Результаты сви-

детельствуют, что возрастание BOLD-сигнала в зонах активации в период выполнения двигательного задания происходит постепенно и достигает плато со средним значением изменения сигнала в  $+1 \div +2\%$  через  $\Delta t \approx 8$  с, что соответствует современным представлениям о BOLD-ответе нервной ткани в рамках временного разрешения использованной методики и оборудования [5, 10]. Спад BOLD-сигнала в период покоя между выполнением двигательного задания тоже происходит постепенно и достигает плато со средним значением изменения сигнала в  $-1 \div -2\%$  через  $\Delta t \approx 12$  с. Таким образом, наблюдаемые суммарные максимальные изменения сигнала могут достигать от  $-2\%$  до  $+2\%$ , то есть перепад до 4 %, хотя усредненные изменения сигнала составляют около 1,1 %, а перепад соответственно 2,2 %.

Полученные нами данные об амплитуде изменения BOLD-сигнала в участках активации (1–2 %) совпадают с данными литературы и сравнимы с изменениями BOLD-сигнала, полученными на приборах МРТ такой же напряженности магнитного поля (1,6–3 %) [5].

## Обсуждение

Головной мозг составляет около 2 % общей массы человека, но утилизирует до 50 % всего потребляемого кислорода. Интенсивность потребления кислорода нейронами составляет 350–450 мкл  $O_2$ /мин (для сердца эта величина составляет 70–90 мкл, для мышц — 1,6–2,4 мкл) [3]. Кислород-транспортная функция крови направлена на снабжение органов и тканей кислородом в соответствии с их потребностями. Биофизическим основанием для метода ФМРТ является увеличение локальной перфузии ткани головного мозга и насыщения крови кислородом при возрастании нейрональной активности [8, 10, 13].

Как известно, метод ФМРТ способен визуализировать макроскопическую активацию участков головного мозга [11]. Рутинные исследования двигательной системы головного мозга с применением ФМРТ зачастую показывают смешанную топографию активации зон коры и подкорки, принимающих участие в ее контроле, так как данные ФМРТ не содержат информации о динамике активации разных участков коры, последовательности их вовлечения в процесс подготовки и выполнения движения [5]. Картина двигательной активации на ФМРТ состоит из первичных ( $M1/S1_{cont}$ ) и вторичных ( $PMv, PMd, SMA$ ) двигательных участков, высших ассоциативных участков (островок, височная, ангулярная извилина), пирамидной и экстрапирамидной системы [12]. В нашем исследовании во всех трех группах мы наблюдали сходную картину активации, что свидетельствует о достоверности визуализации основных узлов двигательной

сети головного мозга методом ФМРТ при ОНМК. Дополнительная активация коры головного мозга у пациентов 2-й и 3-й группы, вероятно, свидетельствует о компенсаторных изменениях (2-я группа) или же об измененном гемодинамическом ответе (3-я группа) [1, 14].

Методы функциональной нейровизуализации, с помощью которых измеряют метаболические или васкулярные параметры (позитронно-эмиссионная томография и ФМРТ), являются косвенными методами измерения, но в то же время имеют хорошее пространственное разрешение, более точное определение зоны активации и ее соответствие анатомическим структурам [8]. Физиологической основой для вышеуказанных методов является активность нейронов головного мозга и изменения в их метаболизме, в частности изменение потребления глюкозы, кислорода, а вследствие этого увеличение оксигенации крови и повышение кровотока — эффект BOLD [10, 11]. Основным источником энергии для мозга является глюкоза. Локальное использование глюкозы — достоверный маркер использования энергии [8]. Учитывая то, что глюкоза в основном метаболизируется аэробным путем, локальное поглощение кислорода пропорционально локальной активности мозга. Также количество поглощенной глюкозы коррелирует с динамикой изменения локального кровотока [8, 10]. Пресинаптическая нейрональная активность требует повышенных затрат энергии, которые в основном приводят к росту аэробного окисления глюкозы. Вслед за нейрональной активацией сигнал направляется в артериолы, которые питают этот участок головного мозга, и они расширяются. Это приводит к увеличению перфузии капилляров. Поскольку уровень кровообращения превышает уровень усвоения кислорода, то растет оксигенация венозных сосудов. При росте кровообращения уровень деоксигемоглобина в венах снижается, что и служит биофизической основой для BOLD-сигнала в ФМРТ [8, 11, 13].

Патогенез церебральной ишемии приводит к снижению энергопродукции и аэробного, а также активации анаэробного пути метаболизма глюкозы, нарушению транспорта ионов через мембраны [3]. Отсутствие внутриклеточного кислорода — конечного акцептора электронов — снижает активность окислительно-восстановительных процессов в дыхательной цепи и приводит к снижению энергообеспеченности ткани. Астроциты выполняют важную роль в энергетическом метаболизме мозга и функционировании глутаматной системы [1, 3, 7]. Они участвуют в обеспечении нейронов энергетическими субстратами в ответ на увеличение синаптической активности, принимая активное

участие в процессе нейроваскулярного сопряжения и BOLD-ответе [10]. При кортикальной активации, вызванной глутаматом, отмечается локальное увеличение утилизации глюкозы в астроцитах [3]. Целью нейроваскулярного сопряжения между нейронами, астроцитами и сосудами является регулирование энергетического потока при нейрональной активации. Глутамат-индуцированное потребление глюкозы и выработка лактата в астроцитах — прямой механизм обеспечения жизнедеятельности нейронов [3]. Ключевым и исходным моментом патогенеза церебральной ишемии является изменение внеклеточной концентрации глутамата, инициируемое аноксической деполяризацией нейрональной мембраны [1, 3]. Резкое увеличение концентрации ионов  $K^+$  в экстрацеллюлярном пространстве приводит к повышенному выбросу глутамата и аспартата в синаптическую щель с одновременным подавлением их поглощения и набуханием астроцитов [1]. Показано, что отек астроцитов может вызывать метаболические изменения [3]. Исходя из описанных данных, визуализация в зонах ишемии при ФМРТ может быть сильно измененной и требует осторожного отношения при интерпретации результатов [9, 14]. В то же время, исходя из экспериментальных данных, представленных в работе, при расположении очага ишемии в белом веществе картина ФМРТ остается в значительной степени сохранной и во многом совпадает с таковой у здоровых лиц. Следовательно, при ишемическом поражении головного мозга патофизиологические изменения, вероятно, приводят к нарушениям гемодинамического ответа на нейрональную активацию, что может приводить к неадекватной визуализации топографии активации на ФМРТ. Подобное, вероятно, наблюдали у пациентов 3-й группы.

## Выводы

Обнаружен феномен высокой корреляции максимального изменения сигнала функциональной магнитно-резонансной томографии и общего объема активации у всех обследованных групп.

Продемонстрировано увеличение усредненного изменения BOLD-сигнала функциональной магнитно-резонансной томографии у пациентов с кортикально-субкортикальной формой острого нарушения мозгового кровообращения по сравнению с пациентами с расположением очага ишемии в белом веществе и со здоровыми лицами (1-я группа < 2-я группа < 3-я группа).

Показаны пластические изменения в двигательной нервной сети головного мозга при различных формах острого нарушения мозгового кровообращения.

## Литература

1. Гусев Е. И. Проблема инсульта // Журн. неврол. и психиатр. — 2003. — 9. — С. 3–6.
2. Кузнецова С. М., Юрченко Ф. В. Влияние тиоцетама на функциональное состояние ЦНС у больных перенесших ишемический инсульт // Мед. неотл. сост. — 2007. — 5 (12). — С. 122–126.
3. Нечипуренко Н. И., Пашковская И. Д., Мусиенко Ю. И. Основные патофизиологические механизмы ишемии головного мозга // Мед. новости. — 2008. — 1. — С. 7–13.
4. Friston K. J., Holmes A. P., Worsley K. J. et al. Statistical parametric maps in functional imaging: a general linear approach // Hum. Brain Mapp. — 1994. — 2 (4). — P. 189–210.
5. Gelderen P., Ramsey N. F., Liu G. Three-dimensional functional magnetic resonance imaging of human brain on a clinical 1.5-T scanner // Proc. Natl. Acad. Sci. — 1995. — 92 (15). — P. 6906–6910.
6. Heerden J., Desmond P. M., Phal P. M. Functional MRI in clinical practice: a pictorial essay // J. Med. Imaging Radiat. Oncol. — 2014. — 58 (3). — P. 320–326.
7. Jackman K., Iadecola C. Neurovascular regulation in the ischemic brain // Antiox & Redox Signal. — 2015. — 22 (2). — P. 149–160.
8. Jueptner M., Weiller C. Review: does measurement of regional cerebral blood flow reflect synaptic activity? — Implications for PET and fMRI // Neuroimage. — 1995. — Vol. 2 — P. 148–156.
9. Mazzetto-Betti K. C., Leoni R. F., Pontes-Neto O. M. The stability of the BOLD fMRI response to motor tasks is altered in patients with chronic ischemic stroke // Stroke. — 2010. — 41 (9). — P. 1921–1926.
10. Moonen C. T. W., Bandettini P. A. Functional MRI. — Berlin: Springer, 2000—575 p.
11. Ogawa S., Lee T., Kay A. et al. Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation // Proc. Natl. Acad. Sci. — 1990. — 87 (24). — P. 9868–9872.
12. Rijntjes M., Dettmers C., Büchel C. et al. A blueprint for movement: functional and anatomical representations in the human motor system // J. Neurosci. — 1999. — 19 (18). — P. 8043–8048.
13. Sibson N. R. et al. Stoichiometric coupling of brain glucose metabolism and glutamatergic neuronal activity // PNAS. — 1998. — Vol. 95 — P. 316–321.
14. Srinivasan A., Goyal M., Al-Azri F. et al. State-of-the-art imaging of acute stroke // Radiographics. — 2006. — 26 (suppl. 1). — P. S75–95.
15. Weimar C., Kurth T., Kraywinkel K. et al. Assessment of functioning and disability after ischemic stroke // Stroke. — 2002. — 33 (8). — P. 2053–2059.

## Особливості нейроваскулярної гемодинамічної відповіді на активацію кори головного мозку в нормі і при гострому порушенні мозкового кровообігу: функціональна магнітно-резонансна томографія

О. М. Омельченко<sup>1,2</sup>, З. З. Рожкова<sup>2</sup>, О. В. Стрепетова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка

<sup>2</sup> Клініка «Борис», Київ

<sup>3</sup> Національний медичний університет імені О. О. Богомольця, Київ

**Мета роботи** — визначити особливості гемодинамічної відповіді у здорових добровольців і пацієнтів з гострим порушенням мозкового кровообігу (ГПМК) при виконанні рухового завдання за допомогою аналізу даних функціональної магнітно-резонансної томографії (ФМРТ).

**Матеріали і методи.** Для визначення ділянок головного мозку, які зазнали ішемії, проведено рутинне МРТ-дослідження. Локалізацію вогнищ ішемії визначали на дифузійно-зважених МРТ-зображеннях. Для оцінки особливостей картування рухової кори при ішемії головного мозку методом ФМРТ досліджено три групи добровольців: 1-ша група складалася з 18 осіб без ознак неврологічних розладів, 2-га група складалася з 3 пацієнтів з ГПМК, у яких вогнище ішемії було розташоване в білій речовині лівої півкулі, 3-тя група складалася з 3 пацієнтів з ГПМК, у яких вогнище ішемії було розташоване в ділянці центральної борозни лівої півкулі. Під час ФМРТ пацієнти виконували рухи правою рукою. Аналіз даних ФМРТ проведений методом загального лінійного моделювання за допомогою програмного забезпечення FSL.

**Результати та обговорення.** У результаті аналізу даних ФМРТ виявлено активацію первинної сенсомоторної ділянки, додаткової моторної ділянки і вентральної премоторної ділянки кори контралатеральної півкулі головного мозку, а також іпсилатеральної півкулі мозочка. У пацієнтів з ГПМК у відповідь на виконання рухового завдання активувалися іпсилатеральна первинна сенсомоторна ділянка, лобно-тім'яна, премоторна кора і обидві півкулі мозочка. Виявлено, що усереднені показники BOLD-сигналу прогресивно змінюються в обстежених групах: 1-ша група (1,1%) < 2-га група (1,8%) < 3-тя група (3,6%). Виявлено кореляцію максимальної зміни амплітуди BOLD-сигналу і загального об'єму активації головного мозку у всіх групах (1-ша група —  $R = 0,84$ , 2-га група —  $R = 0,82$ , 3-тя група —  $R = 0,86$ ).

**Висновки.** Виявлено феномен високої кореляції ( $R > 0,82$ ) максимальної зміни BOLD-сигналу ФМРТ і загального обсягу активації в обстежених групах. Продемонстровано збільшення усередненої зміни BOLD-сигналу ФМРТ у пацієнтів з ГПМК порівняно зі здоровими добровольцями (1-ша група (1,1%) < 2-га група (1,8%) < 3-тя група (3,6%)). Показані компенсаторні пластичні зміни в руховій нервовій мережі головного мозку при ГПМК як наслідок дисфункції первинних функціональних зон.

**Ключові слова:** головний мозок, нейроваскулярна гемодинамічна відповідь, гостре порушення мозкового кровообігу, функціональна магнітно-резонансна томографія, рухова зона кори.

## Peculiarities of neurovascular hemodynamic response to brain cortex activation in normal state and in acute stroke: functional magnetic resonance imaging

O. M. Omelchenko<sup>1,2</sup>, Z. Z. Rozhkova<sup>2</sup>, O. V. Strepetova<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv

<sup>2</sup>Clinic *Boris*, Kyiv

<sup>3</sup>O. O. Bogomolets National Medical University, Kyiv

**The aim** – to determine the peculiarities of the hemodynamic response in healthy subjects and in patients with acute stroke while the motor task execution by the analysis of the functional MRI data.

**Materials and methods.** Routine MRI examination was performed for the examination and evaluation of the ischemic brain regions. Diffusion-weighted MRI was used for the localization of the ischemic regions. Three groups of patients were studied by the fMRI for the evaluation of stroke related motor cortex mapping peculiarities. 1st group included 18 healthy subjects with no signs of neurological disorders; 2nd group included 3 stroke patients with white matter ischemic lesion located in the left hemisphere and 3rd group included 3 stroke patients with ischemic lesion located in central sulcus of the left hemisphere. During fMRI procedure, patients performed right hand motor task. fMRI data analysis was done by the general linear modelling method using FSL software.

**Results and discussion.** The analysis of the fMRI data revealed activation of the primary sensory-motor areas, additional motor area and ventral premotor part of the cortex of brain contralateral hemisphere, and ipsilateral cerebellar hemisphere. In stroke patients, ipsilateral primary sensory-motor cortex, fronto-parietal and premotor cortex and both hemispheres of cerebellum were activated by the motor task execution. It has been revealed that average indexes of BOLD-signal progressively change in the surveyed groups: 1st group (1.1%) < 2nd group (1.8%) < 3rd group (3.6%). Correlation of maximal BOLD-signal change amplitude with the general volume of brain activation was found in all groups: (1st group:  $R = 0.84$ ; 2nd group:  $R = 0.82$ ; 3rd group:  $R = 0.86$ ).

**Conclusions.** Phenomenon of high correlation ( $R > 0.82$ ) of maximal BOLD fMRI signal change and volume of brain activation in the surveyed groups was found. An increase was demonstrated in the mean BOLD changes of fMRI signal in stroke patients compared with healthy volunteers (1st group (1.1%) < 2nd group (1.8%) < 3rd group (3.6%)). Compensatory changes in motor brain network in stroke patients resulting from primary functional zones dysfunction were shown.

**Key words:** brain, neurovascular hemodynamic response, acute stroke, functional magnetic resonance imaging, motor cortex.