

ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1513>

Сопоставимость нейровизуализационных биомаркеров МРТ-перфузии с данными нейропсихологического тестирования при хронической ишемии головного мозга у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС

© Сергеев Н.И.^{1,2}, Куликова Т.А.^{1*}, Нуднов Н.В.¹, Солодкий В.А.¹

¹ ФГБУ «Российский научный центр рентгенорадиологии» Минздрава России; 117997 Москва, ул. Профсоюзная, д. 86, Российская Федерация

² ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России; 117997 Москва, ул. Островитянова, д. 1, Российская Федерация

Одним из перспективных нейровизуализационных методов исследования при цереброваскулярной болезни является МРТ-перфузия головного мозга. Представляет интерес сопоставление выявленных изменений микроциркуляции с результатами нейропсихологического тестирования у лиц с хронической ишемией головного мозга, в том числе у пациентов, подвергшихся техногенному радиационному облучению.

Цель исследования: изучить взаимосвязь между изменениями показателей МРТ-перфузии с результатами нейропсихологического тестирования у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС.

Материал и методы. Обследовано 165 пациентов в возрасте от 55 до 87 лет с диагнозом: хроническая цереброваскулярная болезнь. Основная группа – 97 ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС (ЛПА), контрольная группа – 68 пациентов, не подвергавшихся радиационному воздействию. Оценивались перфузионные изменения (CBV и CBF) в сером и белом веществе правой лобной доли (ROI-1, ROI-2) и аналогично в левом полушарии (ROI-4, ROI-5). В дальнейшем полученные перфузионные данные сопоставлялись с результатами нейропсихологического тестирования.

Результаты. При сравнении показателей МРТ-перфузии (CBV в мл/100 г и CBF в мл/100 г/мин) было установлено статистически значимое снижение указанных параметров в ROI-1 (CBV, $p = 0,010$; CBF, $p = 0,011$) и ROI-4 (CBV, $p = 0,009$; CBF, $p = 0,001$) преимущественно в основной группе. Анализ результатов нейропсихологического тестирования выявил статистически значимое снижение показателей MMSE и MoCA в основной группе по сравнению с контрольной группой. Кроме того, результаты HADS продемонстрировали значимое увеличение значений в основной группе как в разделе тревоги ($p = 0,024$), так и в разделе депрессии ($p = 0,027$) по отношению к показателям лиц контрольной группы. Корреляционный анализ между CBV и CBF в ROI-1, ROI-2, ROI-3, ROI-4 и ROI-5 в соответствии с анатомическими ориентирами головного мозга на уровне передних рогов боковых желудочков по данным МРТ-перфузии и результатам нейропсихологического тестирования выявил статистически значимые прямые корреляционные связи между CBF/CBV в ROI-1/ROI-4 и MMSE, MoCA и HADS.

Заключение. Выявлены более выраженные нарушения показателей перфузии головного мозга у ЛПА по сравнению с контрольной группой, а корреляционный анализ между CBV/CBF и результатами нейропсихологического тестирования установил прямую зависимость клинических проявлений психопатологического синдрома, выражающегося в снижении когнитивных функций с тяжестью нейроваскулярного дефицита у пациентов основной группы, имеющих системную эндотелиальную дисфункцию в связи с техногенным облучением всего тела в отдаленном периоде. Полученные данные демонстрируют и подтверждают эффективность контрастной T2*-перфузии и могут использоваться в качестве нейровизуализационных биомаркеров у лиц с цереброваскулярной болезнью.

Ключевые слова: цереброваскулярная болезнь; МРТ-перфузия; ликвидаторы последствий аварии на ЧАЭС; головной мозг

Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.



Для цитирования: Сергеев Н.И., Куликова Т.А., Нуднов Н.В., Солодкий В.А. Сопоставимость нейровизуализационных биомаркеров МРТ-перфузии с данными нейропсихологического тестирования при хронической ишемии головного мозга у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС. *Медицинская визуализация*. 2025; 29 (1): 11–23. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1513>

Поступила в редакцию: 15.11.2024. **Принята к печати:** 18.12.2024. **Опубликована online:** 14.02.2025.

Comparability of MRI perfusion neuroimaging biomarkers with neuropsychological testing data in chronic cerebral ischemia in Chernobyl disaster liquidators

© Nikolay I. Sergeev^{1,2}, Tatyana A. Kulikova^{1*}, Nikolay V. Nudnov¹, Vladimir A. Solodkiy¹

¹ Russian Scientific Center of Roentgenoradiology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 86, Profsoyusnaya str., Moscow 117997, Russian Federation

² Pirogov Russian National Research Medical University; 1, Ostriviyanova str., Moscow 117997, Russian Federation

Summary. One of the promising neuroimaging methods for studying the brain in cerebrovascular disease is MRI perfusion of the brain. It is of interest to compare the revealed data with the results of specialized neuropsychological testing in individuals with chronic cerebral ischemia, including patients from the risk group – exposed to radiation.

Objective of the study. 165 patients aged 55 to 87 years diagnosed with chronic cerebrovascular disease were examined. The main group included 97 liquidators of the Chernobyl accident (LPA), the control group included 68 patients who were not exposed to radiation. Perfusion changes (CBV and CBF) in the gray and white matter of the right frontal lobe (ROI-1, ROI-2) and similarly in the left hemisphere (ROI-4, ROI-5) were assessed. The obtained perfusion data were then compared with the results of neuropsychological testing. Results. Comparing the MRI perfusion parameters (CBV in ml/100 g and CBF in ml/100 g/min), a statistically significant decrease in the specified parameters was found in ROI-1 (CBV, $p = 0.010$; CBF, $p = 0.011$) and ROI-4 (CBV, $p = 0.009$; CBF, $p = 0.001$), mainly in the main group. Analysis of the neuropsychological testing results revealed a statistically significant ($p = 0.005$) decrease in MMSE and MoCA in the main group compared to the control group. In addition, the HADS results demonstrated a significant increase in values in the main group, both in the anxiety section ($p = 0.024$) and in the depression section ($p = 0.027$) in relation to the control group. Correlation analysis between CBV and CBF in ROI-1, ROI-2, ROI-3, ROI-4 and ROI-5 in accordance with the anatomical landmarks of the brain at the level of the lateral ventricles according to MRI perfusion data and the results of neuropsychological testing revealed statistically significant direct correlations between CBF/CBV in ROI-1/ROI-4 and MMSE, MoCA and HADS.

Conclusions. MRI perfusion revealed more pronounced disturbances in perfusion parameters in LPA compared to the control group, and correlation analysis between CBV/CBF and the results of neuropsychological testing established a direct relationship between the clinical manifestations of the psychopathological syndrome, expressed in a decrease in cognitive functions with the severity of neurovascular deficit in patients of the main group with systemic endothelial dysfunction due to man-made irradiation of the whole body in the late period. The obtained data demonstrate and confirm the effectiveness of contrast T2*-perfusion and can be used as neuroimaging biomarkers in individuals with cerebrovascular disease.

Keywords: cerebrovascular disease; MRI-perfusion; Chernobyl accident liquidators; brain

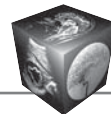
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Sergeev N.I., Kulikova T.A., Nudnov N.V., Solodkiy V.A. Comparability of MRI perfusion neuroimaging biomarkers with neuropsychological testing data in chronic cerebral ischemia in Chernobyl disaster liquidators. *Medical Visualization*. 2025; 29 (1): 11–23. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1513>

Received: 15.11.2024.

Accepted for publication: 18.12.2024.

Published online: 14.02.2025.



Введение

Лежащие в основе цереброваскулярной болезни сосудистые когнитивные нарушения, связанные с острым и/или хроническим нарушением мозгового кровообращения, существенным образом влияют на бытовую, социальную и профессиональную деятельность пациентов, приводя к снижению качества жизни, а в ряде случаев к инвалидизации и развитию полной зависимости от окружающих [1, 2]. В Российской Федерации за 2000 г. число новых выявленных случаев данной патологии составило 2483, в 2019 г. уже 5136 случаев [3]. Цереброваскулярные нарушения с психопатологической симптоматикой выявлялись у 65–80% ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС (ЛПА) начиная с 1992–1994 гг. [4, 5]. Эти сведения согласуются с данными Российского межведомственного экспертного совета по установлению причинно-следственной связи заболеваний, инвалидности и смерти лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварий и катастроф на радиационно опасных объектах [6]. Сложности в дифференциальной диагностике хронической ишемии головного мозга обусловлены большим спектром заболеваний, схожих по клиническим проявлениям, что определяет необходимость в совершенствовании диагностических подходов. Одним из перспективных нейровизуализационных методов обследования является МРТ-перфузия головного мозга, что подтверждается многочисленными работами [7–9].

В литературе мало сведений об эпидемиологии и особенностях дифференциальной диагностики ишемических изменений головного мозга у лиц, подвергшихся радиационному облучению [10]. В частности, у ЛПА характер течения цереброваскулярной патологии отличается более ранним и быстро прогрессирующим течением в отдаленном периоде после техногенного радиационного воздействия вследствие развития системной эндотелиальной дисфункции. Это приводит к раннему формированию психопатологического синдрома с выраженными аффективными расстройствами [11]. Соматическая патология сочетается со стойкими неврозоподобными нарушениями в виде астенодепрессивных, астеноневротических, тревожно-фобических и ипохондрических синдромов. Психопатологические проявления обнаруживают тенденцию к прогрессивности и снижению когнитивных функций вследствие нарастающей ишемии мозга [12, 13]. Крайне мало исследований, посвященных углубленному исследованию параметров перфузии головного мозга у данной когорты пациентов [14, 15]. В связи с этим очевид-

на необходимость изучения особенностей течения хронической невроваскулярной недостаточности у ЛПА в отдаленном периоде с целью определения выраженности сосудистых изменений и когнитивных расстройств для выбора этиопатогенетической терапии.

Цель исследования: поиск корреляционной зависимости между результатами нейропсихологического тестирования и показателями перфузии головного мозга у участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в отдаленном периоде.

Материал и методы

В исследование было включено 165 пациентов мужского пола, страдающих хронической ишемией головного мозга (цереброваскулярная болезнь), диагноз которым был поставлен на основании данных анамнеза, клинико-лабораторных данных и результатов инструментальных методов обследования.

Пациенты были разделены на 2 группы. Основную, 1-ю, группу составили 97 ЛПА с 1986 по 1990 г. Полученная доза внешнего облучения составляла от 0,15 до 0,25 Гр.

В контрольную, 2-ю, группу вошло 68 пациентов с указанным диагнозом, не подвергавшихся радиационному воздействию. Средний возраст всех участников исследования составил $69,8 \pm 0,8$ года.

Данные группы были сформированы на основании разработанных нами критериев включения и исключения. В исследование не допускались лица, имеющие хронические болезни в стадии декомпенсации, новообразования головного мозга, острые нарушения мозгового кровообращения, черепно-мозговые травмы, хроническую сердечно-сосудистую недостаточность, соматические и инфекционные заболевания с энцефалопатией.

В работу были включены 3 нейропсихологических теста, рекомендованных клиническими рекомендациями “Когнитивные расстройства у лиц пожилого и старческого возраста” за 2020 г. [16]:

– **краткая шкала оценки психического статуса** (Mini Mental State Examination – MMSE). Эта шкала позволяет оценивать различные когнитивные функции (ориентировку во времени, месте, восприятие, концентрацию внимания, память, речевые функции). Максимальный балл по шкале составляет 30;

– **монреальская шкала оценки когнитивных функций** (The Montreal Cognitive Assessment – MoCA-test). Шкала была разработана как средство быстрой оценки нейропсихологического статуса при умеренных когнитивных расстройствах (УКР).



Она позволяет оценить различные когнитивные сферы (внимание и концентрацию, управляющие функции, память, язык, зрительно-конструктивные навыки, абстрактное мышление, счет и ориентацию). Максимально возможное количество баллов 30;

– **госпитальная шкала тревоги и депрессии** (Hospital Anxiety and Depression Scale – HADS). Шкала составлена из 14 утверждений, содержащих 2 основных критерия: “тревога” и “депрессия”. Опросник отражает градации выраженности признака и кодируется по нарастанию тяжести симптома от 0 (отсутствие) до 3 (максимальная выраженность). Преимущество HADS заключается в ее лаконичности и универсальности, что делает ее приоритетной для первичной оценки тревожных и депрессивных состояний в клинической практике. Максимальная сумма баллов по каждой подшкале составляет 21.

Отражая различные домены когнитивной сферы, дополняя друг друга, все три шкалы использовались в нашем госпитальном нейропсихологическом исследовании и детализировали особенности поражения высших мозговых функций с более выраженным дефицитом одних когнитивных сфер и относительной сохранностью других.

Протокол МРТ головного мозга включал в себя 4 этапа в соответствии с поставленными задачами:

– **Структурная МРТ:** T2ВИ-AX+SAG, FLAIR AX+COR, T1-AX, T2*_hemo-ax, DWI. Указанные последовательности позволяли оценить хронические структурные изменения, а также исключить объемные образования.

– **Визуализация сосудистого русла:** 3D-TOF-ангиография сосудов виллизиева круга и 3D-венография венозных синусов. Выполнялась для исключения острых обструктивных сосудистых нарушений (рис. 1).

– **Перфузионная часть:** выполнялась контрастная DSC-T2*-перфузия с автоматическим расчетом показателей церебрального объема крови (CBV, cerebral blood volume), церебрального кровотока (CBF, cerebral blood flow), скорости прохождения крови (MTT, mean transit time). Показатели измерялись в белом и сером веществе лобных долей обоих полушарий (рис. 2).

– **Контрастное усиление:** заканчивался протокол выполнением 3D-T1 + C AX для исключения новообразований головного мозга, скрытых сосудистых аномалий.

Режим перфузии на рабочем столе VIDAR VIEWER (с) совмещался с режимом FLAIR с помощью синхронизированного 3D-маркера. Это позволяло нивелировать невысокое пространственное разрешение перфузионных карт и проводить

более точный выбор зон интереса для размещения инструмента ROI (region of interest, зона интереса). У каждого пациента измерялось 5 зон интереса: ROI-1 и ROI-2 для коры и глии лобной доли правого полушария, а ROI-4, ROI-5 аналогично для левого полушария. ROI-3 использовалась в качестве референсной точки наибольших значений кровотока и выставлялась на область, близкую к слиянию венозных синусов (сагиттальный и поперечные). Нечеткая визуализация артерий виллизиева круга ввиду относительно малых диаметров сосудов более чем в половине случаев не позволяла достоверно выставить ROI-артерия, ввиду чего данный критерий не использовался (см. рис. 2).

Все пациенты подписывали добровольное информированное согласие на прохождение нейропсихологического тестирования и контрастного МРТ-исследования на базе ФГБУ РНЦПР Минздрава России, согласия этического комитета для прохождения данного обследования не требовалось.

Статистическая обработка полученных данных выполнялась с использованием электронной таблицы Microsoft Excel и программного обеспечения SPSS для Windows, версия 26.0 (S), Statistica, версия 13.

При сравнении частот встречаемости признаков двух независимых групп использовался точный критерий Фишера или критерий χ^2 с поправкой на правдоподобие в зависимости от количества сопряженных признаков. Для сравнения количественных данных применялся U-критерий Манна–Уитни.

Для проверки на нормальность распределения с целью последующего определения возможности применения параметрических или непараметрических критериев при сравнении групп использовался критерий Шапиро–Уилка и критерий Колмогорова–Смирнова. Данные нашего исследования характеризуются ненормальным распределением, поэтому представлены медианой, верхним и нижним квартилями (Me [Q25%;Q75%]).

Для определения взаимосвязи между результатами нейропсихологического тестирования и данными, полученными во время проведения МРТ-перфузии, применялся корреляционный анализ. Статистически значимой корреляционной связью считалось наличие $p > 0,05$. Критерием оценки связи является коэффициент корреляции r_{xy} Пирсона. Положительное значение взаимосвязи считалось прямым, отрицательное – обратным. Степень тесноты определялась по шкале Чеддока, умеренное значение корреляции (от 0,3 до 0,5), что было приемлемо для подтверждения взаимосвязи признаков.

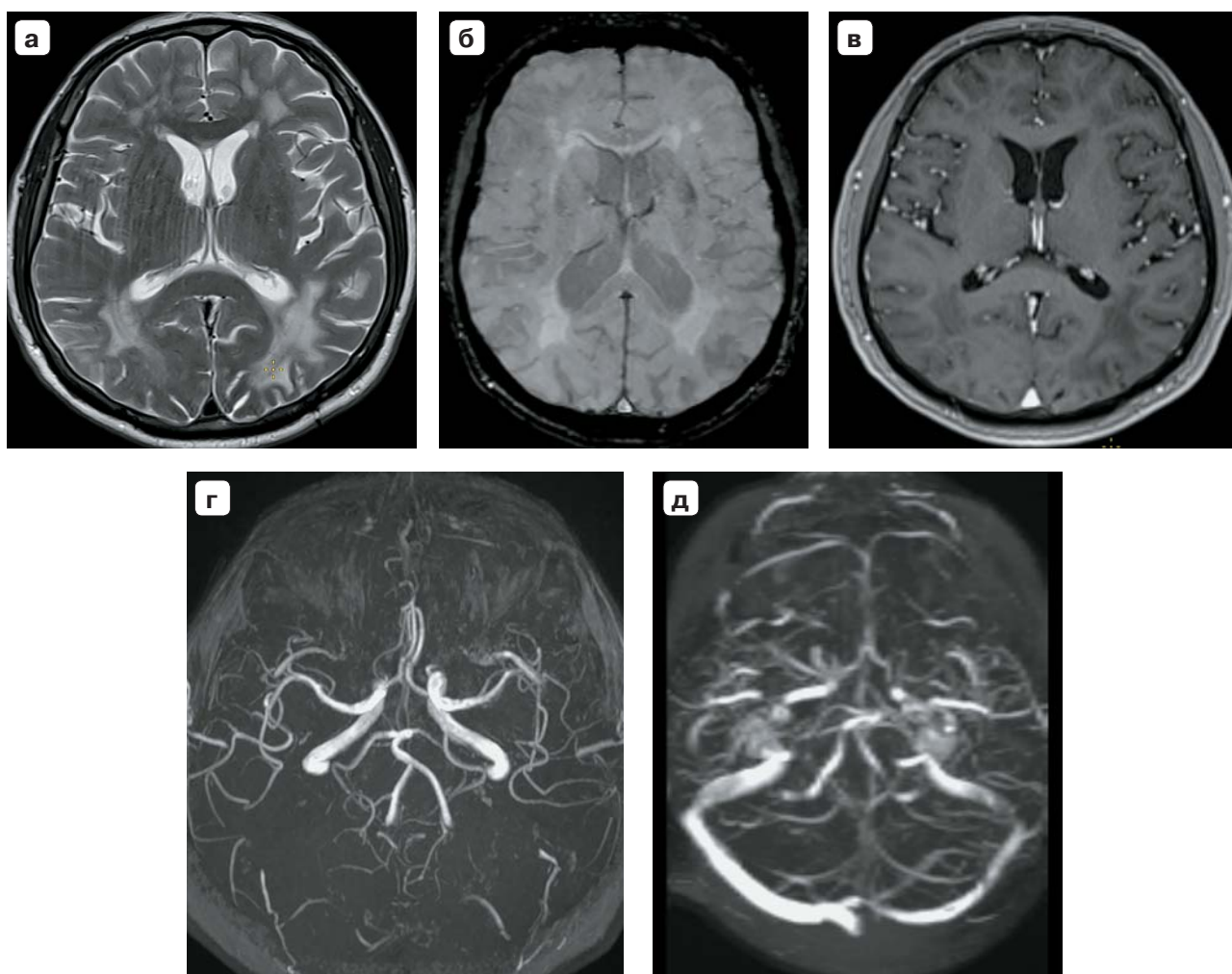
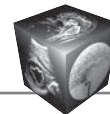


Рис. 1. Пациент П., 1942 года рождения, основная группа. МРТ головного мозга: **а** – в режиме T2ВИ, множественные сливающиеся очаги глиоза в обоих полушариях; **б** – в режиме T2*_hemo, данных о наличии гематомы нет; **в** – в режиме T1 с контрастным усилением, данных о наличии новообразования нет; **г** – в режиме бесконтрастной ангиографии; **д** – в режиме венографии – данных о наличии обструктивных изменений нет.

Fig. 1. Patient P., born in 1942, main group. MRI of the brain in the following modes: **a** – T2VI, multiple merging foci of gliosis in both hemispheres; **б** – T2*_hemo, no data for hematoma; **в** – T1 with contrast enhancement, no data for neoplasms; **г** – in the mode of non-contrast angiography; **д** – venography, – no data for obstructive changes.

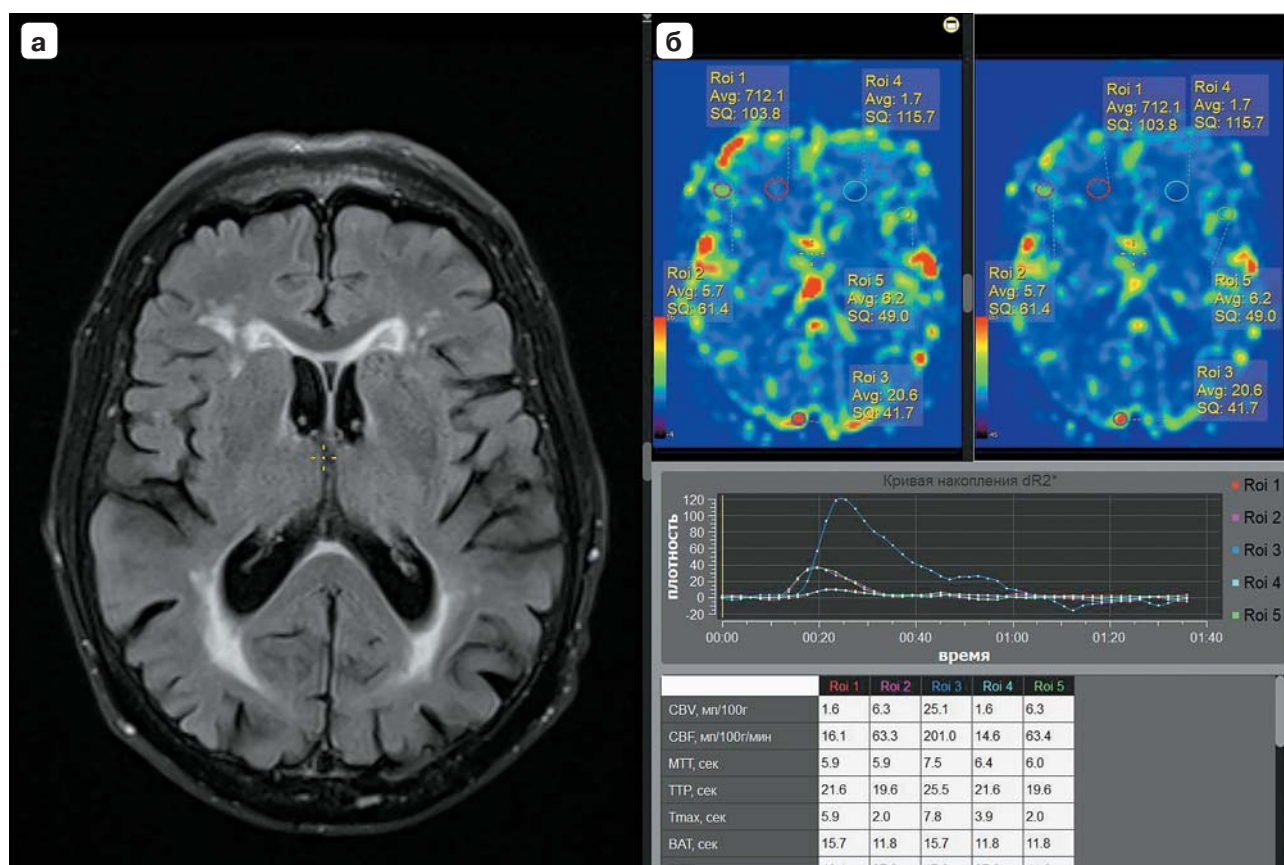
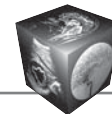


Рис. 2. Тот же пациент. МРТ головного мозга: **а** – в режиме FLAIR определяются множественные сливающиеся перивентрикулярные очаги и зоны глиоза в обоих полушариях; **б** – в режиме перфузии выделено 5 зон интереса, значения CBV, CBF, MTT отражены в таблице, отражены на графике.

Fig. 2. The same patient. MRI of the brain in the modes. **a** – FLAIR, multiple merging periventricular foci and gliosis zones in both hemispheres are determined; **б** – perfusion mode, 5 zones of interest are highlighted, the values of CBV, CBF, MTT are shown in the table, shown on the graph.



Собственные результаты исследования

По данным структурной МРТ у пациентов обеих групп исследования были выявлены признаки глиозных изменений (Fazekas 0–3 степени) и атрофии (0–3 степени) различной степени выраженности. Эти данные были проанализированы и изложены в предыдущих работах [17].

Оценка состояния мозгового кровотока методом МРТ-перфузии

В ходе работы мы получили параметры скорости и объема мозгового кровотока (CBV и CBF) по данным МРТ-перфузии в ROI-1, ROI-2, ROI-3, ROI-4 и ROI-5 в обеих исследуемых группах, что позволило с высокой точностью определить отличительные особенности, характерные для ЛПА. При анализе полученных результатов МРТ-перфузии было зарегистрировано следующее: в ROI-1 (белое вещество правой лобной доли в области переднего рога правого бокового желудочка) продемонстрировано статистически значимое уменьшение CBV (1,65 [1,3; 2,5], $p = 0,010$) и CBF (12,6 [8,2; 21,8], $p = 0,011$) у пациентов основной группы (рис. 3а) по сравнению с контрольной группой (CBV 2,2 [1,7; 3,3], CBF 18,5 [12,6; 26,2]); в ROI-2 (серое вещество правой лобной доли) не было выявлено статистически значимого различия между группами (CBV $p = 0,064$, CBF $p = 0,057$), но приближалось к значимому уровню (рис. 3б). Так, показатели перфузии в основной группе (CBV 7,15 [5,8; 9,8], CBF 55,9 [36,9; 76,0]) имели более низкие значения по сравнению с показателями перфузии контрольной группы (CBV 7,8 [7,0; 13,2], CBF 62,4 [51,5; 80,4]); в ROI-3 (зоны слияния поперечных и сагиттального венозных синусов) также не было зафиксировано статистически значимого различия между группами (CBV, $p = 0,091$, CBF, $p = 0,079$). Однако при рассмотрении данных было установлено, что CBV (17,2 [7,3; 27,4] и CBF (159,2 [98,5; 211,6]) в основной группе отличались более низкими значениями по сравнению с показателями контрольной группы (CBV 20,9 [14,3; 28,8], CBF 192,2 [136,4; 241,3]) (рис. 3, 1-я группа – основная; 2-я группа – контрольная).

Следует отметить, что при рассмотрении результатов МРТ-перфузии в ROI-4 (белое вещество левой лобной доли в области переднего рога левого бокового желудочка) было выявлено статистически значимое уменьшение в основной группе (рис. 3г) CBV (1,9 [1,3; 2,3], $p = 0,009$) и CBF (11,8 [7,7; 20,4], $p = 0,001$) по сравнению с контрольной группой (CBV 2,3 [1,7; 3,1], CBF 19,0 [13,0;

25,4]). При этом в ROI-5 (серое вещество левой лобной доли) статистически значимого различия между группами (CBV $p = 0,076$, CBF $p = 0,084$) не было зафиксировано, но CBV (7,85 [5,9; 10,4]) и CBF (60,3 [39,0; 75,65]) в основной группе имели более низкие значения по сравнению с показателями контрольной группы – CBV 8,85 [7,25; 14,4], CBF 68,6 [51,85; 91,05]).

Результаты нейропсихологического тестирования

Всем пациентам было проведено нейропсихологическое тестирование. При анализе показателей MMSE выявлено статистически значимое снижение результатов ($p = 0,0001$) у пациентов основной группы (18,0 [15,0; 19,0]) по отношению к лицам контрольной группы (22,0 [21,0; 24,0]). Также было отмечено статистически значимое снижение показателей ($p = 0,0001$) MoCA у пациентов основной группы (19,0 [16,0; 20,0]) по отношению к контрольной группе (22,0 [20,0; 24,0]) (рис. 4, 1-я группа – основная, 2-я группа – контрольная).

Результаты тестирования госпитальной шкалы (HADS) продемонстрировали статистически значимое увеличение значений у пациентов основной группы как в разделе “тревога” (10,0 [9,0; 10,0], $p = 0,024$), так и в разделе “депрессия” (9,5 [9,0; 10,0], $p = 0,027$) по сравнению с контрольной группой 8,0 [7,0; 10,0] и 8,0 [7,0; 10,0] соответственно).

Результаты нейропсихологического тестирования демонстрируют признаки умеренного и/или выраженного дефицита когнитивных функций в одном или более когнитивных доменах у ЛПА по отношению к группе сравнения. Дефект когнитивных функций в основной группе пациентов был наиболее выражен со стороны скорости обработки информации, внимания и лобных управляющих функций, а также эмоциональных или личностных расстройств (депрессия, тревожно-аффективные расстройства).

В когнитивной сфере в наибольшей степени страдали управляющие функции (способность планировать и оценивать действия), внимание (способность удерживать внимание и переключать его) и мышление (способность к обобщению, абстрагированию, счету). В значительной мере страдали праксис (за счет неспособности спланировать свои действия), восприятие (как правило, отмечалась его фрагментарность за счет импульсивности, неспособности последовательно проанализировать весь массив предъявляемой информации), а также память.

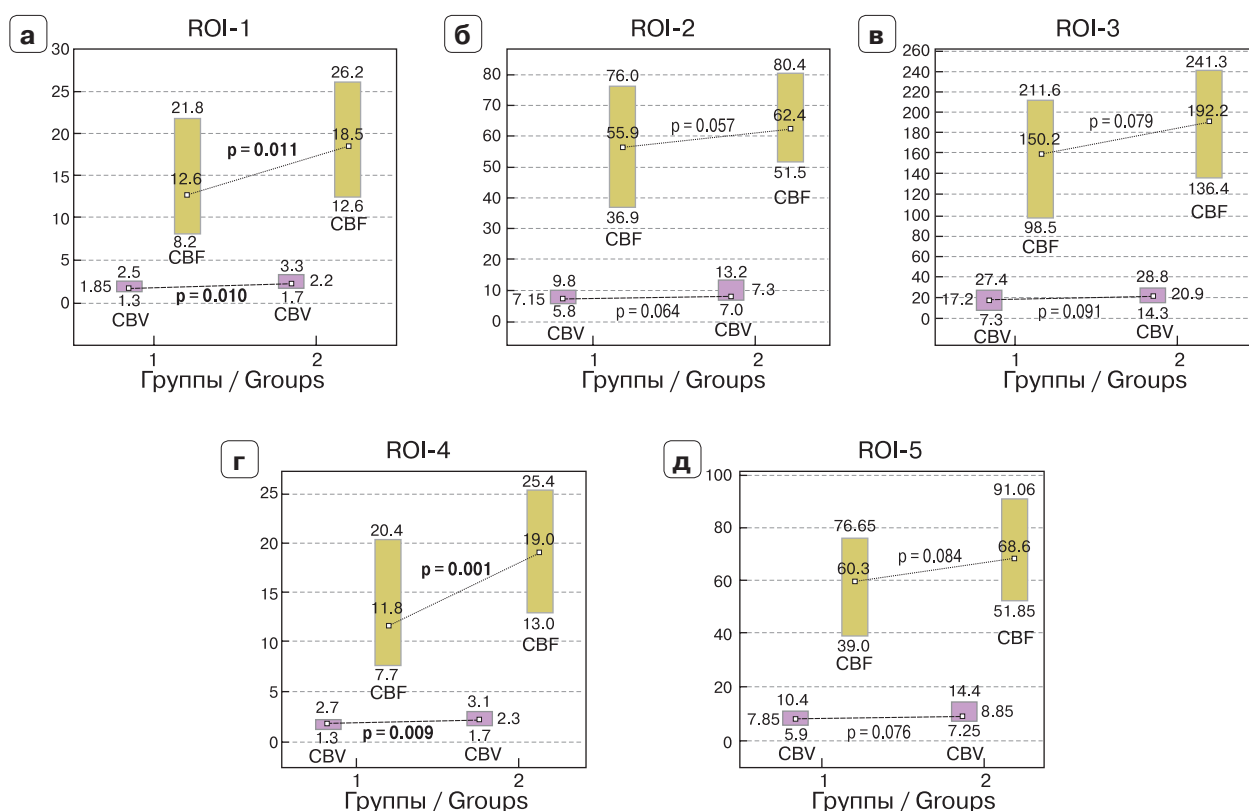


Рис. 3. Церебральный объем крови (мл/100 г) и церебральный кровоток мозговой ткани (мл/100 г/мин) в ROI-1, ROI-2, ROI-3, ROI-4 и ROI-5 в соответствии с анатомическими ориентирами головного мозга на уровне боковых желудочков. **а** – CBV и CBF мозговой ткани в ROI-1; **б** – CBV и CBF мозговой ткани в ROI-2; **в** – CBV и CBF мозговой ткани в ROI-3; **г** – CBV и CBF мозговой ткани в ROI-4; **д** – CBV и CBF мозговой ткани в ROI-5.

Fig. 3. Cerebral blood volume (ml/100 g) and cerebral blood flow of brain tissue (ml/100 g per minute) in ROI-1, ROI-2, ROI-3, ROI-4 and ROI-5 in accordance with the anatomical landmarks of the brain at the level of the lateral ventricles. **a** – CBV and CBF of brain tissue in ROI-1; **b** – CBV and CBF of brain tissue in ROI-2; **v** – CBV and CBF of brain tissue in ROI-3; **г** – CBV and CBF of brain tissue in ROI-4; **д** – CBV and CBF of brain tissue in ROI-5.

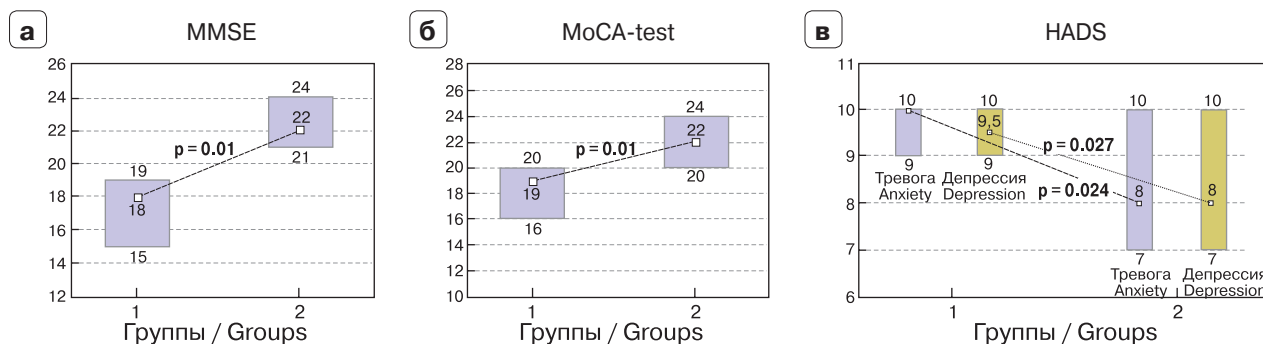
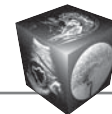


Рис. 4. Данные нейропсихологического тестирования: краткая шкала оценки психического статуса (MMSE), монреальская шкала оценки когнитивных функций (MoCA) и госпитальная шкала тревоги и депрессии (HADS). **а** – MMSE; **б** – MoCA; **в** – HADS. Результаты представлены в виде Me [Q25%;Q75%].

Fig. 4. Neuropsychological testing data: Mini Mental State Examination – MMSE, The Montreal Cognitive Assessment – MoCA-test and Hospital Anxiety and Depression Scale – HADS (Me [Q25%;Q75%]). **a** – MMSE; **б** – MoCA; **в** – HADS.



Корреляционный анализ между CBV, CBF по данным MPT-перфузии и результатами нейропсихологического тестирования

При проведении корреляционного анализа были установлены статистически значимые прямые корреляционные связи между CBV в ROI-1 (белое вещество правой лобной доли в области переднего рога правого бокового желудочка) и MMSE ($r_{xy} = 0,473$; $p = 0,050$), MoCA ($r_{xy} = 0,536$; $p = 0,012$), HADS “тревога” ($r_{xy} = 0,512$; $p = 0,003$) и “депрессия” ($r_{xy} = 0,398$; $p = 0,046$). Все выявленные связи имели умеренную (0,3–0,5) либо заметную (0,5–0,7) тесноту по шкале Чеддока (табл. 1).

Также выявлена статистически значимая прямая корреляционная связь между CBV в ROI-4 (белое вещество левой лобной доли в области переднего рога левого бокового желудочка) и MMSE ($r_{xy} = 0,461$; $p = 0,013$), MoCA ($r_{xy} = 0,537$; $p = 0,009$), HADS “тревога” ($r_{xy} = 0,423$; $p = 0,041$) и “депрессия” ($r_{xy} = 0,651$; $p = 0,004$). Все выявленные связи имели умеренную (0,3–0,5) либо заметную (0,5–0,7) тесноту по шкале Чеддока.

Статистически значимые прямые корреляционные связи зарегистрированы между CBF в ROI-1 (белое вещество правой лобной доли в области переднего рога правого бокового желудочка) и MMSE ($r_{xy} = 0,672$; $p = 0,015$), MoCA ($r_{xy} = 0,672$; $p = 0,015$), HADS “тревога” ($r_{xy} = 0,533$; $p = 0,023$) и “депрессия” ($r_{xy} = 0,325$; $p = 0,004$). Все выявленные связи имели умеренную (0,3–0,5) либо заметную (0,5–0,7) тесноту по шкале Чеддока.

Кроме того, установлена статистически значимая прямая корреляционная связь между CBF в ROI-4 (белое вещество левой лобной доли в области переднего рога левого бокового желудочка) и MMSE ($r_{xy} = 0,492$; $p = 0,032$), MoCA ($r_{xy} = 0,672$; $p = 0,017$), HADS “тревога” ($r_{xy} = 0,562$; $p = 0,003$) и “депрессия” ($r_{xy} = 0,473$; $p = 0,029$). Все выявленные связи имели умеренную (0,3–0,5) либо заметную (0,5–0,7) тесноту по шкале Чеддока (табл. 2).

Результаты корреляционного анализа показывают значимую сопоставимость перфузионных изменений при хронической ишемии головного

Таблица 1. Результаты корреляционного анализа между церебральным объемом крови и церебральным кровотоком в ROI-1, ROI-2, ROI-3, ROI-4, ROI-5 в соответствии с анатомическими ориентирами головного мозга на уровне боковых желудочков по данным MPT-перфузии и результатами нейропсихологического тестирования

Table 1. Results of the correlation analysis between cerebral blood volume and cerebral blood flow in ROI-1, ROI-2, ROI-3, ROI-4, ROI-5 in accordance with the anatomical landmarks of the brain at the level of the lateral ventricles according to MRI perfusion data and the results of neuropsychological testing

CBV (церебральный объем крови)/Тест CBV (Cerebral Blood Volume)/ Test	Краткая шкала оценки психического статуса (MMSE) Mini Mental State Examination – MMSE	Монреальская шкала оценки когнитивных функций (MoCA) The Montreal Cognitive Assessment – MoCA-test	Госпитальная шкала (HADS) тревоги Hospital Anxiety Scale – HADS	Госпитальная шкала (HADS) депрессии Hospital Depression Scale – HADS
ROI-1	$r_{xy} = 0.473$; $p = 0.050^*$	$r_{xy} = 0.536$; $p = 0.012^*$	$r_{xy} = 0.512$; $p = 0.003^*$	$r_{xy} = 0.398$; $p = 0.046^*$
ROI-2	$r_{xy} = 0.107$; $p = 0.122$	$r_{xy} = 0.144$; $p = 0.246$	$r_{xy} = 0.233$; $p = 0.115$	$r_{xy} = 0.303$; $p = 0.542$
ROI-3	$r_{xy} = 0.344$; $p = 0.672$	$r_{xy} = 0.127$; $p = 0.872$	$r_{xy} = 0.249$; $p = 0.215$	$r_{xy} = 0.103$; $p = 0.613$
ROI-4	$r_{xy} = 0.461$; $p = 0.013^*$	$r_{xy} = 0.537$; $p = 0.009^*$	$r_{xy} = 0.423$; $p = 0.041^*$	$r_{xy} = 0.651$; $p = 0.004^*$
ROI-5	$r_{xy} = 0.118$; $p = 0.918$	$r_{xy} = 0.225$; $p = 0.316$	$r_{xy} = 0.112$; $p = 0.618$	$r_{xy} = 0.307$; $p = 0.514$

Примечание. Здесь и в табл. 2: * – статистически значимые значения корреляции.

Note. Here and in table 2: * – statistically significant correlation values.



Таблица 2. Результаты корреляционного анализа между церебральным кровотоком в ROI-1, ROI-2, ROI-3, ROI-4, ROI-5 в соответствии с анатомическими ориентирами головного мозга на уровне боковых желудочков по данным MPT-перфузии и результатами нейропсихологического тестирования

Table 2. Results of the correlation analysis between cerebral blood flow in ROI-1, ROI-2, ROI-3, ROI-4, ROI-5 in accordance with the anatomical landmarks of the brain at the level of the lateral ventricles according to MRI perfusion data and the results of neuropsychological testing

CBV (церебральный объем крови)/Тест CBV (Cerebral Blood Volume)/ Test	Краткая шкала оценки психического статуса (MMSE) Mini Mental State Examination – MMSE	Монреальская шкала оценки когнитивных функций (MoCA) The Montreal Cognitive Assessment – MoCA-test	Госпитальная шкала (HADS) тревоги Hospital Anxiety Scale – HADS	Госпитальная шкала (HADS) депрессии Hospital Depression Scale – HADS
ROI-1	$r_{xy} = 0.672$; $p = 0.015^*$	$r_{xy} = 0.672$; $p = 0.015^*$	$r_{xy} = 0.533$; $p = 0.023^*$	$r_{xy} = 0.325$; $p = 0.004^*$
ROI-2	$r_{xy} = 0.185$; $p = 0.907$	$r_{xy} = 0.231$; $p = 0.557$	$r_{xy} = 0.163$; $p = 0.683$	$r_{xy} = 0.173$; $p = 0.436$
ROI-3	$r_{xy} = 0.288$; $p = 0.739$	$r_{xy} = 0.134$; $p = 0.537$	$r_{xy} = 0.214$; $p = 0.137$	$r_{xy} = 0.146$; $p = 0.239$
ROI-4	$r_{xy} = 0.492$; $p = 0.032^*$	$r_{xy} = 0.672$; $p = 0.017^*$	$r_{xy} = 0.562$; $p = 0.003^*$	$r_{xy} = 0.473$; $p = 0.029^*$
ROI-5	$r_{xy} = 0.234$; $p = 0.863$	$r_{xy} = 0.274$; $p = 0.442$	$r_{xy} = 0.261$; $p = 0.727$	$r_{xy} = 0.109$; $p = 0.377$

мозга с показателями нейропсихологического тестирования, в особенности у пациентов основной группы, подвергшихся техногенному облучению.

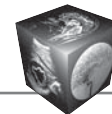
Обсуждение

В отдаленном периоде ведущее место занимают когнитивные и эмоционально-волевые нарушения, которые являются определяющими в инвалидизации и социальной дезадаптации ЛПА [18, 19]. При этом в некоторых исследованиях отмечено, что когнитивные нарушения, которые являются одним из основных клинических проявлений энцефалопатии, зачастую с возрастом пациентов значимой корреляции не имеют [20]. Все больше данных указывает на то, что дисфункция сосудисто-нервного комплекса вносит решающий вклад в развитие хронической ишемии головного мозга и других нейродегенеративных заболеваний [21, 22]. Проведенные исследования демонстрируют более тяжелое течение цереброваскулярной патологии у категории ЛПА и согласуются с нашими данными [23].

Эффективная коммуникация между клетками внутри сосудисто-нервного комплекса обеспечивает точную настройку диаметра сосудов головного мозга в соответствии с активностью нейронов

для поддержания церебральной перфузии и удовлетворения метаболических потребностей. Однако при нарушении регуляции мозгового кровообращения параметры перфузии, которые взаимозависимы, начинают меняться. Так, при снижении парциального перфузионного давления происходит компенсаторное расширение церебральных артериол и снижение сосудистого сопротивления. В последующем при продолжающемся снижении парциального перфузионного давления механизмы ауторегуляции перестают функционировать, расширение церебральных сосудов уже не в состоянии обеспечить адекватную перфузию, что приводит к снижению CBV и CBF [24–26]. Этот статистически подтвержденный эффект, определяемый в нашем исследовании, может служить в качестве нейровизуализационных биомаркеров, характеризующих особенности нарушения мозговой перфузии у разных когорт пациентов, но в более выраженной степени – у ЛПА.

Таким образом, течение хронической ишемии головного мозга у ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС имеет определенные особенности, которые необходимо учитывать при дифференциальной диагностике, а также при выборе патогенетической терапии.



Заклучение

Изучение церебрального кровообращения с помощью контрастной МРТ-перфузии и выявление особенностей изменения ее параметров является потенциальным функциональным биомаркером при хронической ишемии головного мозга, что имеет большое значение при обследовании ЛПА и других лиц, подвергшихся техногенному радиационному воздействию. Полученные данные коррелируют с результатами современных нейropsychологических тестов и могут являться основой при создании рекомендаций с четкими критериями для дифференциальной диагностики хронической ишемии головного мозга у различных групп пациентов, страдающих цереброваскулярной болезнью.

Участие авторов

Сергеев Н.И. – анализ и интерпретация полученных данных, подготовка, создание опубликованной работы.

Куликова Т.А. – обзор публикаций по теме статьи, проведение исследования, написание текста.

Нуднов Н.В. – участие в научном дизайне, ответственность за целостность всех частей статьи.

Солодкий В.А. – концепция и дизайн исследования, утверждение окончательного варианта статьи.

Authors' participation

Sergeev N.I. – analysis and interpretation of the obtained data, preparation and creation of the published work.

Kulikova T.A. – review of publications, conducting research, writing text.

Nudnov N.V. – participation in scientific design, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Solodkiy V.A. – concept and design of the study, approval of the final version of the article.

Список литературы

- Парфенов В.А., Кулеш. А.А. Цереброваскулярное заболевание с когнитивными нарушениями. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2021; 9 (121): 121–130. <https://doi.org/10.17116/jnevro2021121091121>
- Van Der Flier W., Skoog I., Schneider J.A. et al. Vascular cognitive impairment. *Nat. Rev. Dis. Primers*. 2018; 15 (4): 18003. <https://doi.org/10.1038/nrdp.2018.3>
- Фокин В.Ф., Пономарева Н.В., Коновалов Р.Н., Кротенкова М.В., Медведев Р.Б. и др. Сопряженность динамических характеристик функциональной межполушарной асимметрии с коннективностью у больных хроническими цереброваскулярными заболеваниями. *Асимметрия*. 2019; 13 (3): 40–49. <https://doi.org/10.25692/ASY.2019.13.3.004>
- Новиков В.С., Никифоров А.М., Чепрасов В.Ю. Психологические последствия аварии. *Военно-медицинский журнал*. 1996; 6: 57–62.
- Пострелко В.М., Картель М.Т., Коновалов О.Г. Комплексная терапия экзогенно обусловленных астенодепрессивных состояний с использованием энтеросорбции. *Эфферентная терапия*. 1997; 3: 16–20.
- Харченко В.П., Пескин А.В. Заболеваемость участников ликвидации последствий катастрофы на ЧАЭС по данным Российского регионального межведомственного экспертного совета. *Чернобыль. Катастрофа – 12 лет спустя: Материалы международной науч.-практ. конф.* Москва, 18 апреля, 1996: 55–64.
- Ребрикова В.А., Сергеев Н.И., Котляров П.М., Егорова Е.В., Солодкий В.А. Возможности магнитно-резонансной томографии с перфузионной визуализацией в оценке эффективности лучевой терапии у пациентов с глиобластомами головного мозга (обзор литературы). *Вестник Российской академии наук центра рентгенодиологии*. 2022; 22 (1): 121–140.
- Семенов С.Е., Берген Т.А., Месропян Н.А., Смагина А.В., Юркевич Е.А. Возможности применения перфузионных и диффузионных методов в диагностике солитарного повреждения белого вещества головного мозга. *Российский электронный журнал лучевой диагностики*. 2019; 9 (2): 30–46. <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2019-9-2-30-46>
- Lindner T., Bolar D.S., Achten E. et al.; on behalf of the ISMRM Perfusion Study Group. Current state and guidance on arterial spin labeling perfusion MRI in clinical neuroimaging. *Magn. Reson. Med*. 2023; 89 (5): 2024–2047. <https://doi.org/10.1002/mrm.29572>
- Подсонная И.В., Ефремушкин Г.Г., Желобецкая Е.Д. Биоэлектрическая активность головного мозга у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС, страдающих дисциркуляторной энцефалопатией и артериальной гипертензией. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2021; 112 (10): 33–38.
- Алексанин С.С. 30 лет после Чернобыля: патогенетические механизмы формирования соматической патологии, опыт медицинского сопровождения участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской атомной электростанции: монография / Под. ред. С.С. Алексанина. СПб.: Политехника-принт, 2016: 1–506.
- Румянцева Г.М. Психосоматические и сомато-психические аспекты развития психических нарушений у ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС. *Международный журнал радиационной медицины*. 2003; 2 (5): 139–146.
- Лобзин В.Ю. Комплексная ранняя диагностика нарушений когнитивных функций. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2015; 11 (115): 72–79. <https://doi.org/10.17116/jnevro20151151172-79>
- Левашкина И.М., Серебрякова С.В. Возможности высокопольной магнитно-резонансной томографии в оценке дегенеративных изменений головного мозга у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС в отдаленном периоде. *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2016; 4: 98–103. <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2016-0-4-98-103>
- Kashcheev V.V., Chekin S.Y., Maksimov M.A. et al. Radiation-epidemiological Study of Cerebrovascular Diseases in the Cohort of Russian Recovery Operation Workers of the Chernobyl Accident. *Health. Phys.* 2016; 111 (2): 192–197. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000523>
- Боголепова А.Н., Васенина Е.Е., Гомзякова Н.А., Гусев Е.И., Дудченко Н.Г. и др. Клинические рекомендации “Когнитивные расстройства у пациентов пожилого и старческого возраста”. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2021; 10–3 (121): 6–137. <https://doi.org/10.17116/jnevro20211211036>



17. Куликова Т.А., Мешков Н.А., Солодкий В.А., Нуднов Н.В., Сергеев Н.И. МРТ-признаки структурных и перфузионных изменений при хронической ишемии головного мозга у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС в отдаленном периоде. *Медицинская визуализация*. 2024; 28 (3): 65–76. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1490>
18. Румянцева Г.М., Левина Т.М., Чинкина О.В., Степанов А.Л., Соколова Т.Н. Особенности психолого-психиатрических последствий радиационных аварий. *Экология человека*. 2007; 9: 42–47.
19. Левин О.С., Цыганенко Е.В., Чесалин П.В. Нейро-психологические нарушения у лиц, участвовавших в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, в отдаленном периоде. *Неврологический журнал*. 2007; 4: 25–32.
20. Iadecola C. The overlap between neurodegenerative and vascular factors in the pathogenesis of dementia. *Acta Neuropathol*. 2010; 3 (120): 287–296. <https://doi.org/10.1007/s00401-010-0718-6>
21. Lo E. H., Rosenberg G. A. The neurovascular unit in health and disease: introduction. *Stroke*. 2009; 40 (3): S2–3. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.108.534404>
22. Caplan L.R., Searls D.E., Hon F.K.S. Cerebrovascular Disease. *Med. Clin. N. Am.* 2009; 2 (93): 353–369. <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2008.09.004>
23. Горский А.И., Максютков М.А., Чекин С.Ю., Корело А.М., Кочергина Е.В., Зеленская Н.С., Иванов В.К. Влияние облучения на заболеваемость атеросклерозом среди участников ликвидации последствий аварии на чернобыльской атомной электростанции. *Радиация и риск (Бюллетень национального радиационно-эпидемиологического регистра)*. 2023; 32 (4): 14–23. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2023-32-4-14-23>
24. Семенов С.Е., Портнов Ю.М., Хромов А.А., Нестеровский А.В., Хромова А.Н., Семенов А.С. Исследование перфузии при нарушениях церебрального кровообращения. Часть II (частная КТ- и МР-семиотика, паттерны патологических изменений). Обзор. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*. 2017; 6 (1): 102–111. <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2017-1-102-111>
25. Морозов С.П., Насникова И.Ю., Шмырев В.И., Крыжановский С.М., Бадюл М.И. Перфузионная компьютерная томография в диагностике острого нарушения мозгового кровообращения. *Кремлевская медицина*. 2011; 1: 21–24.
26. Welker K., Boxerman J., Kalnin A. et al. ASFNR Recommendations for Clinical Performance of MR Dynamic Susceptibility Contrast Perfusion Imaging of the Brain. Wintermark and for the American Society of Functional Neuroradiology MR Perfusion Standards and Practice Subcommittee of the ASFNR Clinical Practice Committee. *Am. J. Neuroradiol*. 2015, 36 (6): E41–E51. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A4341>
1. Parfenov V.A., Kulesh A.A. Cerebrovascular disease with cognitive impairment. *Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2021; 9 (121): 121–130. <https://doi.org/10.17116/jnevro2021121091121> (In Russian)
2. Van Der Flier W., Skoog I., Schneider J.A. et al. Vascular cognitive impairment. *Nat. Rev. Dis. Primers*. 2018; 15 (4): 18003. <https://doi.org/10.1038/nrdp.2018.3>
3. Fokin V.F., Ponomareva N.V., Konovalov R.N. et al. Correlation of dynamic characteristics of functional interhemispheric asymmetry with connectivity in patients with chronic cerebrovascular diseases. *Asymmetry*. 2019; 13 (3): 40–49. <https://doi.org/10.25692/ASY.2019.13.3.004> (In Russian)
4. Novikov V.S., Nikiforov A.M., Cheprasov V.Y. Psychological consequences of the accident. *Military Medical Journal*. 1996; 6: 57–62. (In Russian)
5. Postrelko V.M., Kartel M.T., Konovalov O.G. Complex therapy of exogenously conditioned asthenodepressive conditions using enterosorption. *Efferent therapy*. 1997; 3: 16–20. (In Russian)
6. Kharchenko V.P., Peskin A.V. Morbidity of participants of liquidation of consequences of catastrophe at Chernobyl NPP according to the data of Russian regional interdepartmental expert council. Chernobyl. Catastrophe – 12 years later: materials of international. Scientific-practical. Conf., Moscow, April 18, 1996: 55–64. (In Russian)
7. Rebrikova V.A., Sergeev N. I., Kotlyarov P. M., Egorova E.V., Solodkiy V.A. Possibilities of magnetic resonance imaging with perfusion visualization in assessment of efficiency of radiation therapy in patients with glioblastomas of brain (literature review). *Bulletin of the Russian Scientific Center of Roentgenology and Radiology*. 2022; 22 (1): 121–140. (In Russian)
8. Semenov S.E., Bergen T.A., Mesropyan N.A. et al. Possibilities of using perfusion and diffusion methods in the diagnosis of solitary damage to the white matter of the brain. *Russian Electronic Journal of Radiation Diagnostics*. 2019; 9 (2): 30–46. <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2019-9-2-30-46> (In Russian)
9. Lindner T., Bolar D.S., Achten E. et al.; on behalf of the ISMRM Perfusion Study Group. Current state and guidance on arterial spin labeling perfusion MRI in clinical neuroimaging. *Magn. Reson. Med*. 2023; 89 (5): 2024–2047. <https://doi.org/10.1002/mrm.29572>
10. Podsonnaya I.V., Efremushkin G.G., Zhelobetskaya E.D. Bioelectrical activity of the brain in liquidators of the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant suffering from cerebrovascular accident and arterial hypertension. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2021; 112 (10): 33–38. (In Russian)
11. Aleksanin S.S. 30 years after Chernobyl: pathogenetic mechanisms of formation of somatic pathology, experience of medical support of participants in the liquidation of the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant: monograph / Ed. S.S. Aleksanin. SPb.: Politekhnik-print, 2016: 1–506. (In Russian)
12. Rumyantseva G.M. Psychosomatic and somatopsychic aspects of development of mental disorders in liquidators of consequences of the Chernobyl accident. *International Journal of Radiation Medicine*. 2003; 2 (5): 139–146. (In Russian)
13. Lobzin V.Yu. Comprehensive early diagnostics of cognitive functions disorders. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2015; 11 (115): 72–79. <https://doi.org/10.17116/jnevro201511511172-79> (In Russian)
14. Levashkina I.M., Serebryakova S.V. Possibilities of high-field magnetic resonance imaging in assessment of degenerative changes of the brain in liquidators of consequences of the Chernobyl accident in the remote period. *Medical, biological and socio-psychological problems of safety in emergency situations*. 2016; 4: 98–



103. <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2016-0-4-98-103> (In Russian)
15. Kashcheev V.V., Chekin S.Y., Maksimov M.A. et al. Radiation-epidemiological Study of Cerebrovascular Diseases in the Cohort of Russian Recovery Operation Workers of the Chernobyl Accident. *Health. Phys.* 2016; 111 (2): 192–197. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000523>
16. Bogolepova A.N., Vasenina E.E., Gomzyakova N.A. et al. Clinical guidelines “Cognitive disorders in elderly and senile patients”. *Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2021; 10–3 (121): 6–137. <https://doi.org/10.17116/jnevro20211211036> (In Russian)
17. Kulikova T.A., Meshkov N.A., Solodkiy V.A. et al. MRI signs of structural and perfusion changes in chronic cerebral ischemia in liquidators of the consequences of the Chernobyl accident in the late period. *Medical Visualization*. 2024; 28 (3): 65–76. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1490> (In Russian)
18. Rumyantseva G.M., Levina T.M., Chinkina O.V. et al. Features of psychological and psychiatric consequences of radiation accidents. *Human Ecology*. 2007; 9: 42–47. (In Russian)
19. Levin O.S., Tsyganenko E.V., Chesalin P.V. Neuro-psychological disorders in individuals who participated in the liquidation of the consequences of the Chernobyl accident in the late period. *Neurological Journal*. 2007; 4: 25–32. (In Russian)
20. Iadecola C. The overlap between neurodegenerative and vascular factors in the pathogenesis of dementia. *Acta Neuropathol*. 2010; 3 (120): 287–296. <https://doi.org/10.1007/s00401-010-0718-6>
21. Lo E. H., Rosenberg G. A. The neurovascular unit in health and disease: introduction. *Stroke*. 2009; 40 (3): S2–3. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.108.534404>
22. Caplan L.R., Searls D.E., Hon F.K.S. Cerebrovascular Disease. *Med. Clin. N. Am.* 2009; 2 (93): 353–369. <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2008.09.004>
23. Gorsky A.I., Maksyutov M.A., Chekin S.Y. et al. The effect of radiation exposure on the incidence of atherosclerosis among participants in the liquidation of the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Radiation and Risk (Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Registry)*. 2023; 32 (4): 14–23. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2023-32-4-14-23> (In Russian)
24. Semenov S.E., Portnov Yu.M., Khromov A.A. et al. Perfusion study in cerebral circulatory disorders. Part II (particular CT and MR semiotics, patterns of pathological changes). Review. *Complex Issues of Cardiovascular Diseases*. 2017; 6 (1): 102–111. <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2017-1-102-111> (In Russian)
25. Morozov S.P., Nasnikova I.Yu., Shmyrev V.I. et al. Perfusion computed tomography in diagnostics of acute cerebrovascular accident. *Kremlin Medicine*. 2011; 1: 21–24. (In Russian)
26. Welker K., Boxerman J., Kalnin A. et al. ASFNR Recommendations for Clinical Performance of MR Dynamic Susceptibility Contrast Perfusion Imaging of the Brain. Wintermark and for the American Society of Functional Neuroradiology MR Perfusion Standards and Practice Subcommittee of the ASFNR Clinical Practice Committee. *Am. J. Neuroradiol*. 2015, 36 (6): E41–E51. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A4341>

Для корреспонденции*: Куликова Татьяна Анатольевна – e-mail: tkulikova61@gmail.com

Сергеев Николай Иванович – доктор мед. наук, заведующий лабораторией рентгенорадиологии научно-исследовательского отдела комплексной диагностики заболеваний и радиотерапии ФГБУ “Российский научный центр рентгенорадиологии” Минздрава России; профессор кафедры рентгенорадиологии ФДПО ФГАОУ ВО “Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-4147-1928>

Куликова Татьяна Анатольевна – канд. мед. наук, заведующая терапевтическим отделением клиники ядерной медицины ФГБУ “Российский научный центр рентгенорадиологии” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0009-0005-1763-5031>

Нуднов Николай Васильевич – доктор мед. наук, профессор заместитель директора по научной работе, заведующий научно-исследовательским отделом комплексной диагностики заболеваний и радиотерапии ФГБУ “Российский научный центр рентгено-радиологии” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-5994-0468>

Солодкий Владимир Алексеевич – академик РАН, доктор мед. наук, профессор, директор ФГБУ “Российский научный центр рентгенорадиологии” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-1641-6452>

Contact*: Tatyana A. Kulikova – e-mail: tkulikova61@gmail.com

Nikolay I. Sergeev – Doct. of Sci. (Med.), Head of the Laboratory of X-ray Radiology of the Research Department of Complex Diagnostics of Diseases and Radiotherapy of the Russian Scientific Center of Roentgenoradiology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation;

Professor of the Department Roentgenoradiology of FDPO of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-4147-1928>

Tatyana A. Kulikova – Cand. of Sci. (Med.), Head of the therapeutic department of the Nuclear Medicine Clinic, Russian Scientific Center of Roentgenoradiology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0009-0005-1763-5031>

Nikolay V. Nudnov – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Deputy Director for Scientific Work, Head of the Research Department for Complex Diagnostics of Diseases and Radiotherapy, Russian Scientific Center of Roentgenoradiology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-5994-0468>

Vladimir A. Solodkiy – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doct. of Sci. (Med.), Professor, Director of the Russian Scientific Center of Roentgenoradiology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-1641-6452>