

Возможности метода бесконтрастной перфузионной МРТ в количественной оценке изменений церебрального кровотока

В.В. Попов^{1,2}, Ю.А. Станкевич^{1,2}, О.Б. Богомякова^{1,2}, А.А. Тулупов^{1,2}

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

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

Резюме

Бесконтрастная МР-перфузия (arterial spin labeling, ASL) позволяет оценивать перфузию исследуемых тканей, имея существенные преимущества в виде неинвазивности и возможности неоднократного повторения исследования, что дает возможность осуществлять динамическое наблюдение за пациентом без контрастной нагрузки. Одной из самых перспективных тенденций современных исследований является оценка перфузионных изменений головного мозга при диагностике ишемического инсульта (ИИ). Цель исследования – провести комплексную динамическую оценку перфузионных изменений головного мозга у пациентов в раннем постинсультном восстановительном периоде и условно-здоровых добровольцев методом ASL. **Материал и методы.** Осуществлено проспективное наблюдение двух групп исследуемых; в группу контроля вошли 20 условно здоровых добровольцев в возрасте от 18 до 25 лет ($21,8 \pm 2,6$ года) (среднее арифметическое $\pm$ стандартное отклонение), в группу патологии – 20 человек с верифицированным ИИ в возрасте от 40 до 70 лет ($59,4 \pm 9,2$ года) на 1–3-и, 7–10-е сутки и спустя 3 месяца после манифестации заболевания. Интегрально оценены показатели перфузии серого и белого вещества долей больших полушарий головного мозга (теменная, затылочная, лобная, височная), рассчитаны значения перфузии в ипси- и контралатеральных относительно очага инсульта областях интереса. **Результаты и их обсуждение.** У пациентов с ИИ очаг инсульта имеет нелинейную динамику изменений перфузии с $19,86 \pm 5,69$ мл/100 г/мин на 1–3-и сутки, повышением показателя до $27,57 \pm 4,86$ мл/100 г/мин на 7–10-е сутки и уменьшением до $14,48 \pm 3,66$ мл/100 г/мин к 3–4-му месяцу, оставаясь в пределах низких значений по сравнению с визуально-интактными областями и контрольной группой. Перфузия в визуально-интактной области ипсилатерального по отношению к очагу инсульта полушария на 1–3-и и 7–10-е сутки статистически значимо ($p < 0,05$) снижена по сравнению с другими областями интереса на 4–5 %. При этом наблюдается плавное нарастание значений перфузии во всех анализируемых объемных областях от первого исследования к третьему. **Заключение.** Методика ASL позволяет количественно оценивать динамику церебральной перфузии раннего восстановительного периода с регистрацией статистически значимого снижения ($p < 0,001$) тканевого кровотока в очаге ишемии относительно анализируемых областей интереса головного мозга и контрольной группы. Интактная область в ипсилатеральном по отношению к очагу инсульта полушарии имеет плавную динамику роста от гипоперфузии к нормоперфузии, что связано с вовлечением мозга как органа в целом и постепенным восстановлением его перфузионной характеристики.

Ключевые слова: ишемический инсульт, бесконтрастная перфузия, ASL, pCASL, CBF.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование проведено при поддержке Минобрнауки России (гос. задание: 1023110800234-5-3.2.25;3.1.4;3.2.12, «Изучение процессов постинсультной структурно-функциональной реорганизации головного мозга современными методами нейровизуализации»).

Автор для переписки: Попов В.В., e-mail: popov.v@tomo.nsc.ru

Для цитирования: Попов В.В., Станкевич Ю.А., Богомякова О.Б., Тулупов А.А. Возможности метода бесконтрастной перфузионной МРТ в количественной оценке изменений церебрального кровотока. *Сибирский научный медицинский журнал*. 2024;44(6):210–217. doi: 10.18699/SSMJ20240622

The possibilities of the non-contrast MRI perfusion in the quantitative assessment of changes in cerebral blood flow

V.V. Popov^{1,2}, Yu.A. Stankevich^{1,2}, O.B. Bogomyakova^{1,2}, A.A. Tulupov^{1,2}

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

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

Abstract

Arterial spin labeling (ASL) allows the assessment of tissue perfusion and has advantages such as non-invasiveness and the ability to repeat examinations multiple times. This enables dynamic monitoring without contrast administration. This technique requires additional pre- and post-processing, complicating result acquisition. A promising trend is the assessment of brain perfusion changes for diagnosing ischemic stroke. Aim of the study was to evaluate a comprehensive dynamic perfusion change in the brain in patients in the early post-stroke recovery period and conditionally healthy volunteers by the ASL. **Material and Methods.** A prospective observation of two groups was performed. The control group included 20 conditionally healthy volunteers aged from 18 to 25 years (21.8 ± 2.65 years) (mean $\pm$ standard error of the mean), the study group – 20 patients with verified ischemic stroke aged from 40 to 70 years (59.4 ± 9.2 years) on days 1–3, 7–10, and three months after disease onset. Perfusion indicators of gray and white matter of the lobes of the cerebral hemispheres (parietal, occipital, frontal, temporal) in visually intact areas of the brain were integrally evaluated. Perfusion values were also calculated in ipsilateral and contralateral regions of interest relative to the stroke focus. **Results and discussion.** The stroke focus shows a nonlinear dynamic of changes, starting from 19.86 ± 5.69 ml/100 g/min on days 1–3, increasing to 27.57 ± 4.86 ml/100 g/min on days 7–10, and decreasing to 14.48 ± 3.66 ml/100 g/min by the 3–4 month, remaining low compared to visually intact areas and the control group. Perfusion in the visually intact area of the ipsilateral hemisphere in relation to the stroke focus is significantly ($p < 0.05$) reduced by 4–5 % on days 1–3 and 7–10 compared to other regions of interest. Meanwhile, there is a gradual increase in perfusion values in all analyzed regions from the first to the third examination. **Conclusions.** The ASL method allows for the quantitative assessment of the dynamics of cerebral perfusion in the early recovery period, with a significant ($p < 0.001$) reduction in tissue blood flow in the ischemic focus relative to the analyzed regions of interest and the control group. The intact area in the ipsilateral hemisphere in relation to the stroke focus shows dynamic growth from hypoperfusion to normoperfusion, which is related to the involvement of the brain as a whole organ.

Key words: ischemic stroke, contrast-free perfusion, ASL, pCASL, CBF.

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

Financing. The study was supported by Ministry of Education and Science of Russia (1023110800234-5-3.2.25;3.1.4;3.2.12, “Studying the processes of post-stroke structural and functional reorganization of the brain using modern neuroimaging methods”).

Correspondence author: Popov V.V., e-mail: popov.v@tomo.nsc.ru

Citation: Popov V.V., Stankevich Yu.A., Bogomyakova O.B., Tulupov A.A. The possibilities of the non-contrast MRI perfusion in the quantitative assessment of changes in cerebral blood flow. *Sibirskij nauchnyj medicinskij zhurnal* = *Siberian Scientific Medical Journal*. 2024;44(6):210–217. [In Russian]. doi: 10.18699/SSMJ20240622

Введение

Бесконтрастная МР-перфузия (arterial spin labeling, ASL) является развивающейся методикой, которая позволяет оценивать и анализировать перфузионные свойства тканей, а также исследовать изменения церебральной перфузии на фоне проводимого лечения [1]. В настоящее время разработано несколько вариантов импульсных последовательностей ASL: импульсная, непрерывная, псевдонепрерывная (pseudocontinuous ASL, pCASL) и скорость-селективная. Последовательность pCASL показала себя наиболее оптимальной в качественной и количественной оценке перфузии головного мозга при различных структурно-функциональных поражениях [2, 3]. Одной из самых перспективных тенденций современных исследований является оценка перфузионных изменений головного мозга в диагности-

ке ишемического инсульта (ИИ) [4, 5], объемных образований [2], а также рассеянного склероза [6, 7]. Неоспоримыми преимуществами ASL являются отсутствие лучевой нагрузки и неинвазивность, как следствие, отсутствие необходимости в контрастном препарате и осложнений. Это особенно актуально для пациентов с тяжелыми острыми или хроническими заболеваниями [3], поскольку позволяет выполнять неоднократные динамические наблюдения при необходимости. Среди недостатков данной методики – большая чувствительность к артефактам (стоматологические металлоконструкции, движение, неоднородности магнитного поля), относительно маленькое соотношение сигнал/шум, невысокое пространственное разрешение, отсутствие стандартизированных алгоритмов постобработки и получения количественных значений. Последнее обусловли-

ваит необходимость создания клинически применимого алгоритма получения и обработки количественных результатов перфузии.

Применение метода ASL при ИИ позволяет не только количественно оценить изменение перфузии головного мозга в динамике, но и сформировать прогноз, скорректировать лечение и реабилитацию. Величина мозгового кровотока (cerebral blood flow, CBF) больше у пациентов с конечным благоприятным исходом, что отмечается в публикациях, демонстрирующих высокую ценность метода в диагностике ИИ [8–10]; эффективность методики подтверждена у пациентов с РС [11]. ASL может обеспечить потенциально новые показатели исхода, особенно при прогрессирующем РС, характеризующемся более выраженным снижением показателей перфузии при динамическом наблюдении [12]. ASL также позволяет оценивать нарушение микроциркуляции у пациентов с клиникой рецидивирующего РС и может выявлять изменения в перфузионной характеристике их головного мозга даже при отсутствии структурных изменений [13].

Цель исследования – провести комплексную динамическую оценку перфузионных изменений головного мозга у пациентов в раннем постинсультном восстановительном периоде и условно здоровых добровольцев методом ASL.

Материал и методы

Выполнено проспективное наблюдение двух групп исследуемых. В группу контроля вошли 20 условно здоровых добровольцев в возрасте от 18 до 25 лет ($21,8 \pm 2,6$ года), без признаков объемно-очаговых патологий головного мозга. В группу патологии включены 20 человек в возрасте от 40 до 70 лет ($59,4 \pm 9,2$ года) с подтвержденным диагнозом ИИ на 1–3-и сутки (первое исследование), 7–10-е сутки (второе исследование) и спустя 3 месяца (третье исследование) после манифестации заболевания. Исследование одобрено локальным этическим комитетом Международного томографического центра СО РАН, участники подписали добровольное информированное согласие. Исследование проводилось на МР-томографе с напряженностью магнитного поля 3,0 Тл, использован рутинный протокол сканирования (включающий T1-ВИ, T2-ВИ, FLAIR, DWI), дополненный последовательностью pCASL (табл. 1). Данные тщательно сортировали и интерпретировали: исключены лица с выраженными/некорректируемыми артефактами от движений и стоматологических металлоконструкций.

В связи с существующими сложностями постобработки данных для анализа выбрано про-

Таблица 1. Параметры pCASL

Table 1. Pseudo continuous Arterial Spin Labeling (pCASL) parameters

Параметр	Значение
FOV	240×240×99
Matrix	88×88
Slices	20
TR	4550
TE	16
Gap	1
Dynamics	40
Fast Imaging mode	EPI
Voxel	2.73×2.73×5.00
Label duration (LD)	1800
Post labeling delay (PLD)	1800 (контроль); 2000 (ИИ)

граммное обеспечение BASIL с дополнением пакета сегментации T1-ВИ на основе плагина FSLanat. Данное приложение не поддерживает встроенную конвертацию DICOM-файлов в необходимый для анализа Niifti-формат, что требует дополнительных этапов постобработки. На первом этапе для отбора изображений использовали Radiant, в дальнейшем применяли MRICroGL для конвертации данных. Вторым этапом осуществлена загрузка данных в приложение BASIL: нативных source-ASL изображений (1600 ед.), а также T1-ВИ (181 ед.) и изображений протонной плотности (20 ед.) с учетом выбранных параметров и значений (см. табл. 1). Следующим этапом являлись реслайсинг, калибровка с протонной плотностью и корегистрация получаемых нативных CBF-карт с T1-ВИ в пакете FSLanat с получением значений согласно анатомическим атласам (286 размеченных зон) [14].

У обследованных обеих групп выполняли интегральную оценку серого и белого вещества визуально интактных областей головного мозга в полуавтоматическом режиме с выделением лобной, теменной, затылочной и височной долей по данным корегистрированного анатомического атласа. При разметке исключали область инсульта и ликворные пространства с целью нивелирования их вклада в значения перфузии. У пациентов с ИИ оценивали CBF в четырех областях интереса (рис. 1): очаг ишемии (CBF stroke, CBFs), интактная область в ипсилатеральном полушарии (CBF ipsilateral, CBFi), интактная область в контралатеральном полушарии (CBF contralateral, CBFc), интактная область в диагонально отдаленном контралатеральном полушарии (CBF farthest, CBFf).

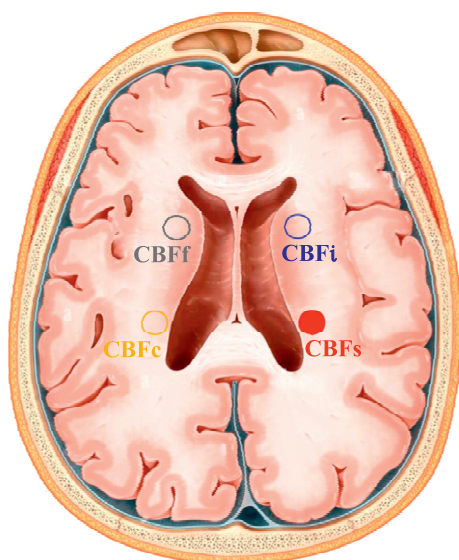


Рис. 1. Схема расположения анализируемых областей интереса (ROI)

Fig. 1. The scheme of the analyzed region of interest (ROI)

Объемный участок на интересующих срезах выделяли с необходимой корректировкой границ интактной и пораженной мозговой ткани. В область интереса включали пораженное белое и серое вещество подкорковых структур головного мозга, без учета ликворосодержащих пространств, что дополнительно требовало использование коррекции частичного объема (partial volume correction, PVC), при котором CBF серого вещества оценивается в каждом вокселе путем регрессии объемов серого и белого вещества из изображений перфузии [15, 20].

Статистическую обработку проводили в программах: STATISTICA 10 (StatSoft Inc., США) и Microsoft Excel в пакете Microsoft Office (Microsoft, США). Проверку нормальности распре-

ления изучаемых количественных показателей оценивали с помощью критерия Колмогорова – Смирнова и Шапиро – Уилка, а также построением нормальных вероятностных графиков, оценки асимметрии, эксцесса и стандартной ошибки асимметрии, эксцесса. После определения нормальности распределения, а также с учетом выборки применяли параметрическую статистику для независимых выборок. Переменные представлены в виде среднего арифметического и среднеквадратического отклонения ($M \pm SD$), для оценки различий использовали t-критерий Стьюдента. Критический уровень значимости нулевой статистической гипотезы (p) принимали равным 0,05.

Результаты

Выполнен проспективный анализ 20 условно здоровых добровольцев с построением индивидуальных карт перфузии головного мозга, корегистрированных по данным T1-ВИ со значениями pCASL, что позволяло произвести качественную и количественную оценку характеристики мозгового кровотока, а также определить наличие патологических областей снижения показателей перфузии (рис. 2, табл. 2).

Выполнено трехкратное динамическое наблюдение пациентов с ИИ и построены карты церебральной перфузии для каждого из наблюдений (рис. 3). В группе патологии получены значения церебральной перфузии областей по аналогии с группой контроля, а также отдельно изучено индивидуальное изменение церебральной перфузии в зонах интереса – в очаге инсульта (CBFs), ипсилатерально (CBFi) и контралатерально (CBFc и CBFF). Выявлено статистически значимое ($p < 0,001$) диффузное снижение показателей перфузии во всех анализируемых долях головного

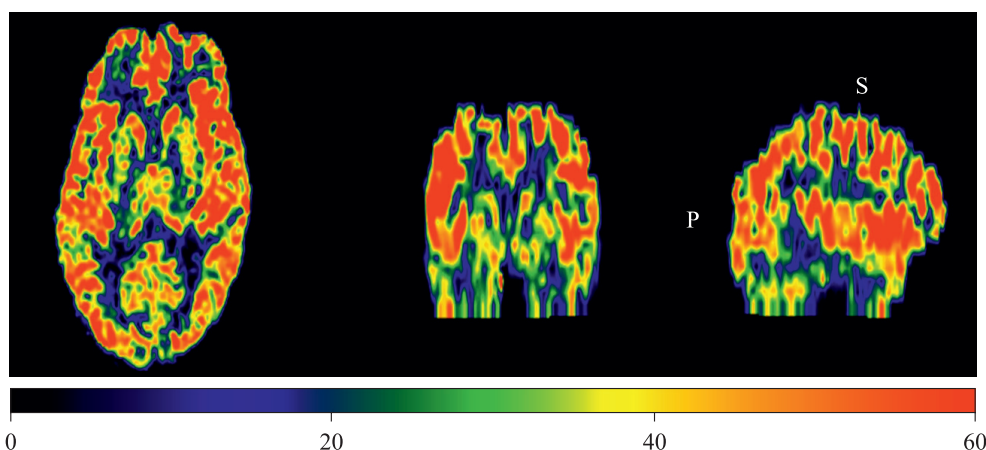


Рис. 2. Карта бесконтрастной перфузии здорового добровольца по данным pCASL

Fig. 2. Non-contrast MR perfusion map of a healthy volunteer by pCASL data

Таблица 2. Показатели перфузии областей головного мозга контрольной группы и группы патологии по данным pCASL (CBF, мл/100г/мин)

Table 2. Perfusion values of the brain regions of control group and of the study group by pCASL

Группа	Область интереса	Теменные доли	Затылочные доли	Лобные доли	Височные доли
Группа контроля	Серое вещество	$46,7 \pm 3,17$	$46,4 \pm 2,44$	$47,9 \pm 3,90$	$45,8 \pm 2,79$
	Белое вещество	$18,54 \pm 3,22$ ($p > 0,05$)			
Пациенты с ИИ (1–3-и сутки)	Серое вещество	$35,72 \pm 3,64^*$	$36,90 \pm 2,60^*$	$37,2 \pm 3,4^*$	$36,86 \pm 3,4^*$
	Белое вещество	$18,02 \pm 3,86$ ($p > 0,05$)			

Примечание. * – отличие от величины соответствующего показателя группы контроля статистически значимо при $p < 0,001$.

мозга (лобные, теменные, височные, затылочные) в пределах 15 % у больных ИИ относительно контрольной группы (см. табл. 2). При этом белое вещество головного мозга было оценено суммарно во всех долях головного мозга, без значимых различий между группами ($p > 0,05$).

При анализе зон интереса в группе патологии выявлено, что в очаге ишемии происходит повышение значений перфузии от первого (1–3-и сутки) ко второму (7–10 дней) наблюдению, оставаясь статистически значимо меньше контроля, к третьему наблюдению (3-й месяц) величина CBFs становится меньше исходной. При этом в очаге ишемии CBFs значимо меньше ($p < 0,001$), чем в других анализируемых областях интереса и в контрольной группе, на протяжении трех исследований (рис. 4). Выявлено, что CBFi на 1–3-и и 7–10-е сутки после манифестации заболевания достоверно ($p < 0,05$) снижено по сравнению с другими областями интереса в пределах 4–5 %. При этом наблюдается плавное нарастание значений перфузии во всех анализируемых объемных областях от первого исследования к третьему.

Обсуждение

В литературе представлен ряд исследований, где отмечается, что значения перфузии у условно здоровых добровольцев может варьировать в зависимости как от технических и параметрических характеристик оборудования и исследования, так и от индивидуальных особенностей обследуемого: пол, возраст, наличие стрессового состояния, церебро- и кардиоваскулярные заболевания, что подтверждает необходимость проведения дальнейших крупных когортных исследований [16, 17]. Отмечается разброс определяемых нормальных значений перфузии серого и белого вещества от $65,38 \pm 4,0$ и $20,78 \pm 2,2$ [18], до $48,02 \pm 7$ и $21,50 \pm 4,61$ мл/100 г/мин [19] соответственно, с большей вариабельностью для серого вещества. В нашем исследовании у лиц контрольной группы значения перфузии серого и белого вещества составили $46,70 \pm 3,12$ и $18,54 \pm 3,22$ мл/100 г/мин соответственно, что согласуется с полученными другими исследователями [20, 21] и подтверждает эффективность и надежность применяемого алго-

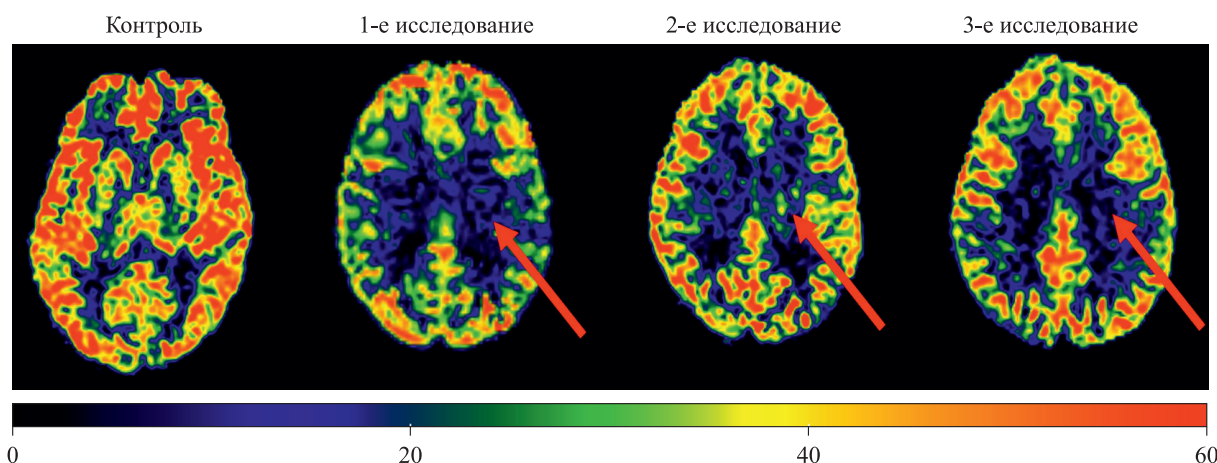


Рис. 3. Карта бесконтрастной перфузии здорового добровольца и пациента с ИИ (1–3 исследование). Красная стрелка – очаг ишемии в динамическом наблюдении

Fig. 3. Non-contrast MR perfusion map of a healthy volunteer and a patient with ischemic stroke (for 1–3 studies). The red arrow indicates the focus of ischemia in dynamic observation

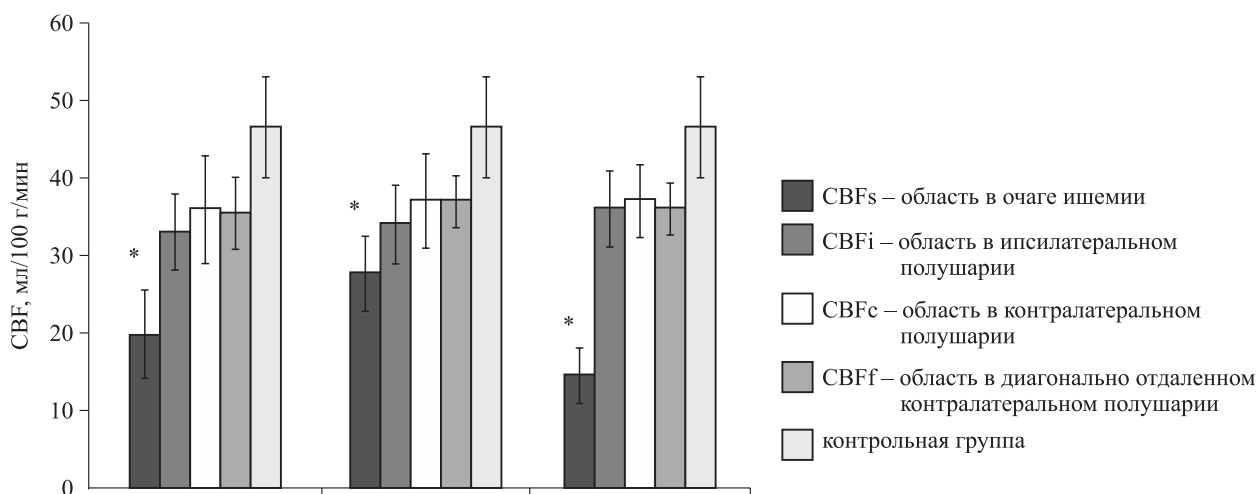


Рис. 4. Динамическое изменение показателей перфузии у лиц контрольной группы и пациентов с ИИ по данным pCASL при 1-м (а), 2-м (б) и 3-м исследовании (в); * – отличие от величины соответствующего показателя визуально интактных областей и группы контроля статистически значимо при $p < 0,001$

Fig. 4. Dynamic changes in perfusion characteristics in control group subjects and patients with ischemic stroke according to pCASL data in the 1st (a), 2nd (б) and 3rd study (в); * – the difference from the value of the corresponding indicator of visually intact areas and the control group is statistically significant at $p < 0.001$

ритма [22] для получения количественных значений перфузии [23, 24].

При анализе перфузии серого и белого вещества головного мозга у исследуемой группы пациентов с ИИ выявлено диффузное снижение показателей во всех анализируемых долях головного мозга (лобные, теменные, височные, затылочные) в пределах 15 % относительно контрольной группы. Показан значимый вклад фактора возраста в изменение церебральной перфузии [25], необходимы дальнейшие исследования для определения корреляции выявленных изменений между возрастными особенностями и патологическим состоянием. Тем не менее множество научных публикаций подтверждает выявленную плавную однонаправленную динамику роста показателей перфузии визуально-интактного серого и белого вещества головного мозга в процессе восстановления пациента [26, 27].

Анализ динамики перфузии в очаге ишемии относительно других объемных областей позволил установить, что значения CBFs достоверно снижаются до 45, 24 и 60 % для первого, второго и третьего наблюдения соответственно. При этом наблюдаемое повышение значений в очаге ишемии от первого ко второму исследованиям, очевидно, связано с результатом терапевтических мероприятий и этиопатогенетическими механизмами течения ИИ и выражается в компенсаторном усилении микроциркуляции на фоне реперфузионной терапии, а также местными воспалительными реакциями в области ишемии,

повышением проницаемости сосудов, диапедезным пропитыванием кровью и экстравазацией жидкостного компонента, что в конечном итоге приводит к повышению показателей перфузии во втором наблюдении [28, 29]. К третьему исследованию показатели перфузии в очаге ишемии уменьшаются, что связано с глиозно-атрофической трансформацией области поражения [30].

Достоверное снижение величины CBFi в первом и втором наблюдениях относительно других анализируемых областей интереса в пределах 4–5 %, вероятно, связано с вовлечением в патологическое состояние не только визуализируемых пораженных участков, но и головного мозга как органа в целом. При анализе показателей контралатерального полушария CBFc и CBFf также наблюдается плавное линейное нарастание значений перфузии от первого исследования к третьему [31]. При этом значения CBFi, CBFc, CBFf меньше величин контрольной группы в анатомически схожих ориентирах, что, вероятно, связано с возрастными изменениями показателей перфузии или патологическим состоянием и требует дальнейшего изучения [32].

Заключение

Методика ASL позволяет количественно оценивать динамику церебральной перфузии раннего восстановительного периода с регистрацией снижения ($p < 0,001$) тканевого кровотока (на 45 % для первого, 24 % для второго, 60 % для третьего исследований) в очаге ишемии от-

носителем анализируемых объемных областей головного мозга и контрольной группы. Интактная область в ипсилатеральном очагу инсульта полушария имеет плавную динамику роста от гипоперфузии к нормоперфузии, что связано с вовлечением мозга как органа в целом и постепенным восстановлением его перфузионной характеристики. Существующие преимущества и недостатки метода ASL обязывают относиться к полученным результатам с должной осторожностью, однако описанные в литературе данные по его достоверности и эффективности позволяют сказать о несомненной значимости метода при проведении диагностических мероприятий, верификации патологических ишемических состояний, а также в комплексной оценке эффективности лечения и формирования прогноза пациента. Рекомендуется проводить калибровку и получать надежные референсные значения ASL-перфузии на конкретном МР-оборудовании. Несмотря на существующие преимущества и недостатки данного метода, ASL обладает высокой потенциальной ценностью для применения в различных клинических ситуациях.

Список литературы / References

1. Alsop D., Detre J., Golay X., Günther M., Hendrikse J., Hernandez-Garcia L., Lu H., MacIntosh B., Parkes L., Smits M., ... Zaharchuk G. Recommended implementation of arterial spin-labeled perfusion MRI for clinical applications: A consensus of the ISMRM perfusion study group and the European consortium for ASL in dementia. *Magn. Reson. Med.* 2015;73(1):102–116. doi: 10.1002/mrm.25197
2. Telischak N., Detre J., Zaharchuk G. Arterial spin labeling MRI: clinical applications in the brain. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2015;41(5):1165–1180. doi: 10.1002/jmri.24751
3. Taso M., Alsop D. Arterial spin labeling perfusion imaging. *Magn. Reson. Imaging. Clin. N. Am.* 2024;32(1):63–72. doi: 10.1016/j.mric.2023.08.005
4. Wang D. Editorial for “Arterial Spin Labeling Estimation of Penumbral Tissue in Acute Ischemic Stroke”. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2023;57(4):1248–1249. doi: 10.1002/jmri.28389
5. Daftari Besheli L., Ahmed A., Hamam O., Luna L., Sun L., Urrutia V., Hillis A., Tekes-Brady A., Yedavalli V. Arterial Spin Labeling technique and clinical applications of the intracranial compartment in stroke and stroke mimics. *Neuroradiol. J.* 2022;35(4):437–453. doi: 10.1177/19714009221098806
6. Ota M., Sato N., Nakata Y., Ito K., Kamiya K., Maikusa N., Ogawa M., Okamoto T., Obu S., Noda T., ... Kunugi H. Abnormalities of cerebral blood flow in multiple sclerosis: a pseudocontinuous arterial spin labeling MRI study. *Magn. Reson. Imaging.* 2013;31(6):990–995. doi: 10.1016/j.mri.2013.03.016
7. Lapointe E., Li D., Traboulsee A., Rauscher A. What have we learned from perfusion MRI in multiple sclerosis? *AJNR Am J Neuroradiol.* 2018;39(6):994–1000. doi: 10.3174/ajnr.A5504
8. Zaharchuk G. Arterial spin-labeled perfusion imaging in acute ischemic stroke. *Stroke.* 2014;45(4):1202–1207. doi: 10.1161/strokeaha.113.003612
9. Reinoud B., Daymara H., José M., Raymond M., Matthias O., Jeroen H., Steven W., Lawrence L.; National Institutes of Health Stroke Natural History Investigators. Whole-brain arterial spin labeling perfusion MRI in patients with acute stroke. *Stroke.* 2012;43(5):1290–1294. doi: 10.1161/strokeaha.110.589234
10. Huang Y., Liu H., Lee J., Yang J., Weng H., Lee M., Yeh M.Y., Tsai Y.H. Comparison of arterial spin labeling and dynamic susceptibility contrast perfusion MRI in patients with acute stroke. *PLoS One.* 2013;8(7):e69085. doi: 10.1371/journal.pone.0069085
11. Narayana P., Zhou Y., Hasan K., Datta S., Sun X., Wolinsky J. Hypoperfusion and T1-hypointense lesions in white matter in multiple sclerosis. *Mult. Scler.* 2014;20(3):365–373. doi: 10.1177/1352458513495936
12. Hojjat S., Cantrell C., Vitorino R., Feinstein A., Shirzadi Z., MacIntosh B., Crane D., Zhang L., Morrow S., Lee L., ... Aviv R. Regional reduction in cortical blood flow among cognitively impaired adults with relapsing-remitting multiple sclerosis patients. *Mult. Scler.* 2016;22(11):1421–1428. doi: 10.1177/1352458515622696
13. Mascali D., Villani A., Chiarelli A., Biondetti E., Lipp I., Digiovanni A., Pozzilli V., Caporale A., Rispoli M., Ajdinaj P., ... Wise R.G. Pathophysiology of multiple sclerosis damage and repair: Linking cerebral hypoperfusion to the development of irreversible tissue loss in multiple sclerosis using magnetic resonance imaging. *Eur. J. Neurol.* 2023;30(8):2348–2356. doi: 10.1111/ene.15827
14. Wu D., Ma T., Ceritoglu C., Li Y., Chotianonta J., Hou Z., Hsu J., Xu X., Brown T., Miller M., Mori S. Resource atlases for multi-atlas brain segmentations with multiple ontology levels based on T1-weighted MRI. *Neuroimage.* 2016;125:120–130. doi: 10.1016/j.neuroimage.2015.10.042
15. Clement P., Petr J., Dijsselhof M., Padrela B., Pasternak M., Dolui S., Jarutyte L., Pinter N., Hernandez-Garcia L., Jahn A., ... Keil V. A Beginner's guide to arterial spin labeling (ASL) image processing. *Front. Radiol.* 2022;2:929533. doi: 10.3389/fradi.2022.929533
16. Neumann K., Schidlowski M., Günther M., Stöcker T., Düzel E. Reliability and reproducibility of hadamard encoded pseudo-continuous arterial spin labeling in healthy elderly. *Front. Neurosci.* 2021;15:711898. doi: 10.3389/fnins.2021.711898
17. Lin T., Qu J., Zuo Z., Fan X., You H., Feng F. Test-retest reliability and reproducibility of long-label pseudo-continuous arterial spin labeling. *Magn. Reson. Imaging.* 2020;73:111–117. doi: 10.1016/j.mri.2020.07.010
18. Soni N., Jain A., Kumar S., Pandey C., Awasthi A. Arterial spin labeling magnetic resonance perfusion study to evaluate the effects of age and gender on

- normal cerebral blood flow. *Neurol. India*. 2016;64(Suppl):32–38. doi: 10.4103/0028-3886.178037
19. Xu G., Rowley H., Wu G., Alsop D., Shankaranarayanan A., Dowling M., Christian B., Oakes T., Johnson S. Reliability and precision of pseudo-continuous arterial spin labeling perfusion MRI on 3.0 T and comparison with 15O-water PET in elderly subjects at risk for Alzheimer's disease. *NMR Biomed*. 2010;23(3):286–293. doi: 10.1002/nbm.1462
20. Hales P., Kawadler J., Aylett S., Kirkham F., Clark C. Arterial spin labeling characterization of cerebral perfusion during normal maturation from late childhood into adulthood: normal 'reference range' values and their use in clinical studies. *J. Cereb. Blood Flow. Metab*. 2014;34(5):776–784. doi: 10.1038/jcbfm.2014.17
21. Weber M., Günther M., Lichy M., Delorme S., Bongers A., Thilmann C., Essig M., Zuna I., Schad L., Debus J., Schlemmer H. Comparison of arterial spin-labeling techniques and dynamic susceptibility-weighted contrast-enhanced MRI in perfusion imaging of normal brain tissue. *Invest. Radiol*. 2003;38(11):712–718. doi: 10.1097/01.rli.0000084890.57197.54
22. Станкевич Ю.А., Попов В.В., Василькив Л.М., Тулупов А.А. Динамическая оценка микроциркуляторных изменений головного мозга в раннем постинсультном периоде по данным бесконтрастной перфузионной МРТ. *Комплекс. пробл. сер.-сосуд. забол.* 2024;13(1):28–35. doi: 10.17802/2306-1278-2024-13-1-28-35
- Stankevich Yu.A., Popov V.V., Vasil'kiv L.M., Tulupov A.A. Dynamic assessment of cerebral perfusion blood flow in the early post-stroke period according to non-contrast MRI data. *Kompleksnye problemy serdechno-sosudistykh zabolevaniy = Complex Issues of Cardiovascular Diseases*. 2024;13(1):28–35. [In Russian]. doi: 10.17802/2306-1278-2024-13-1-28-35
23. Huang J., Hao P., Chen Z., Deng K., Liu B., Xu Y. Quantitative assessment of hyperperfusion using arterial spin labeling to predict hemorrhagic transformation in acute ischemic stroke patients with mechanical endovascular therapy. *Eur. Radiol*. 2024;34(1):579–587. doi: 10.1007/s00330-023-10007-5
24. Clement P., Petr J., Dijsselhof M., Padrela B., Pasternak M., Dolui S., Jarutyte L., Pinter N., Hernandez-Garcia L., Jahn A., ... Keil V. A beginner's guide to arterial spin labeling (ASL) image processing. *Front. Radiol*. 2022;2:929533. doi: 10.3389/fradi.2022.929533
25. Aracki-Trenkic A., Law-Ye B., Radovanovic Z., Stojanov D., Dormont D., Pyatigorskaya N. ASL perfusion in acute ischemic stroke: The value of CBF in outcome prediction. *Clin. Neurol. Neurosurg*. 2020;194:105908. doi: 10.1016/j.clineuro.2020.105908
26. Crisi G., Filice S., Scoditti U. Arterial spin labeling MRI to measure cerebral blood flow in untreated ischemic stroke. *J. Neuroimaging*. 2019;29(2):193–197. doi: 10.1111/jon.12569
27. van Gelderen P., de Zwart J., Duyn J. Pitfalls of MRI measurement of white matter perfusion based on arterial spin labeling. *Magn. Reson. Med*. 2008;59(4):788–795. doi: 10.1002/mrm.21515
28. Tanaka Y., Nagaoka T., Nair G., Ohno K., Duong T. Arterial spin labeling and dynamic susceptibility contrast CBF MRI in postischemic hyperperfusion, hypercapnia, and after mannitol injection. *J. Cereb. Blood Flow. Metab*. 2011;31(6):1403–1411. doi: 10.1038/jcbfm.2010.228
29. Huang H., Li X., Wang X., Liang B., Li H., Liang J. Diffusion-weighted imaging and arterial spin labeling for prediction of cerebral infarct volume in acute atherothrombotic stroke. *Curr. Med. Imaging*. 2023;19(3):271–277. doi: 10.2174/1573405618666220509205920
30. Nam K., Kim C., Yoon B., Hwang I., Sohn C. Multiphase arterial spin labeling imaging to predict early recurrent ischemic lesion in acute ischemic stroke. *Sci. Rep*. 2022;12(1):1456. doi: 10.1038/s41598-022-05465-8
31. Mouchtouris N., Ailes I., Gooch R., Raimondo C., Oghli Y., Tjoumakaris S., Jabbour P., Rosenwasser R., Alizadeh M. Quantifying blood-brain barrier permeability in patients with ischemic stroke using non-contrast MRI. *Magn. Reson. Imaging*. 2024;109:165–172. doi: 10.1016/j.mri.2024.03.027
32. de Vis J., Hendrikse J., Bhogal A., Adams A., Kappelle L., Petersen E. Age-related changes in brain hemodynamics; A calibrated MRI study. *Hum. Brain Mapp*. 2015;36(10):3973–3987. doi: 10.1002/hbm.22891

Сведения об авторах:

Попов Владимир Владимирович, ORCID: 0000-0003-3082-2315, e-mail: vladimirpopov_2303@mail.ru
Станкевич Юлия Александровна, к.м.н., ORCID: 0000-0002-7959-5160
Богомякова Ольга Борисовна, ORCID: 0000-0002-8880-100X
Тулупов Андрей Александрович, д.м.н., проф., чл.-корр. РАН, ORCID: 0000-0002-1277-4113

Information about the authors:

Vladimir V. Popov, ORCID: 0000-0003-3082-2315, e-mail: vladimirpopov_2303@mail.ru
Yuliya A. Stankevich, candidate of medical sciences, ORCID: 0000-0002-7959-5160
Olga B. Bogomyakova, ORCID: 0000-0002-8880-100X
Andrey A. Tulupov, doctor of medical sciences, professor, corresponding member of RAS, ORCID: 0000-0002-1277-4113

Поступила в редакцию 15.07.2024

После доработки 20.08.2024

Принята к публикации 19.11.2024

Received 15.07.2024

Revision received 20.08.2024

Accepted 19.11.2024