

**МЕТОДИКА АРТЕРИАЛЬНОГО СПИНОВОГО МАРКИРОВАНИЯ: КЛИНИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ**

Труфанов Г.Е., Фокин В.А., Асатурян Е.Г., Ефимцев А.Ю., Шмедьк Н.Ю.,  
Мащенко И.А., Чегина Д.С., Алдатов Р.Х.

**А**ртериальное спиновое маркирование (Arterial spin labeling; ASL) – это методика магнитно-резонансной томографии (МРТ), которая позволяет оценивать гипо- и гиперперфузию головного мозга. Это имеет большое значение для комплексной диагностики различных патологических состояний головного мозга таких, как нарушение мозгового кровообращения, опухоли, нейроинфекции, дегенеративно-атрофические заболевания, сосудистые заболевания и др. Ниже мы более подробно рассмотрим применение ASL с точки зрения клинической практики.

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова» Минздрава России.  
г. Санкт-Петербург, Россия.

**Ключевые слова:** артериальное спиновое маркирование, карты мозгового кровотока, магнитно-резонансная перфузия головного мозга, гипоперфузия, гиперперфузия.

**Контактный автор:** Труфанов Г.Е., e-mail: trufanovge@mail.ru

*Для цитирования:* Труфанов Г.Е., Фокин В.А., Асатурян Е.Г., Ефимцев А.Ю., Шмедьк Н.Ю., Мащенко И.А., Чегина Д.С., Алдатов Р.Х. Методика артериального спинного маркирования: клиническое применение. REJR 2019; 9(4):129-147. DOI:10.21569/2222-7415-2019-9-4-129-147.

**Статья получена:** 12.08.19

**Статья принята:** 12.09.19

**ARTERIAL SPIN LABELING: CLINICAL APPLICATIONS**

Trufanov G.E., Fokin V.A., Asaturyan E.G., Efimtsev A.Yu., Shmedyk N.Yu.,  
Mashchenko I.A., Chegina D.S., Aldatov R.Kh.

**А**rterial spin labeling (Arterial spin labeling, ASL) is a magnetic resonance imaging (MRI) technique that allows to evaluate the hypo- and hyperperfusion of the brain. This is of great importance for the for complex diagnostics of various pathological conditions of the brain, such as cerebral circulation disorders, tumors, neuroinfections, degenerative-atrophic diseases, vascular diseases, etc. We use ASL from the point of view of clinical practice

V.A. Almazov National Medical Research Center.  
Saint-Petersburg, Russia.

**Keywords:** arterial spin-labeling, maps of cerebral blood flow, MR perfusion of brain, hypoperfusion, hyperperfusion.

**Corresponding author:** Trufanov G.E., e-mail: trufanovge@mail.ru

*For citation:* Trufanov G.E., Fokin V.A., Asaturyan E.G., Efimtsev A.Yu., Shmedyk N.Yu., Mashchenko I.A., Chegina D.S., Aldatov R.Kh. Arterial spin labeling: clinical applications. REJR 2019; 9(4):129-147. DOI:10.21569/2222-7415-2019-9-4-129-147.

**Received:** 12.08.19

**Accepted:** 12.09.19

**Паттерны гипоперфузии.**

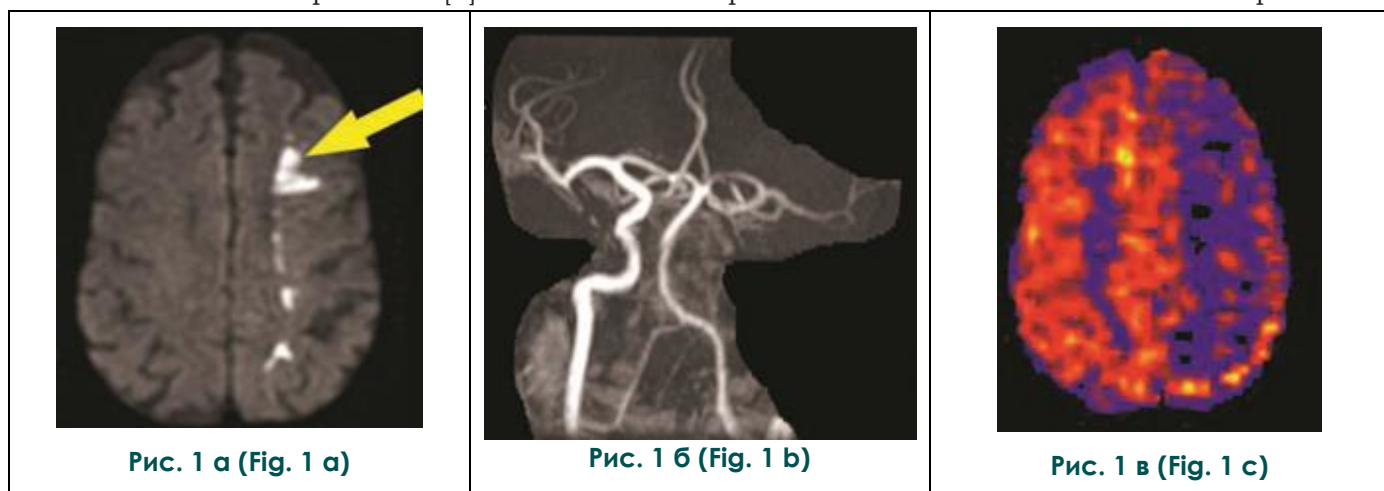
Основным преимуществом ASL так же, как и других перфузионных методов, является способность визуализировать ткани с риском ишемии или инфаркта. Диффузионно-взвешенные изображения (ДВИ) являются методом выбора в диагностике инсультов, но их применение лимитировано возможностью визуализации лишь очагов тяжелой ишемии. Выявление участков ишемии средней и легкой степени (ишемической пенумбры) требует оценки скорости объемного мозгового кровотока, объема мозгового кровотока или среднего времени транзита.

С помощью ASL можно выявить бессимптомные стенозы брахиоцефальных артерий, наблюдая асимметричные зоны значительного снижения мозгового кровотока [1].

тяжелой ишемии, в котором кровотока снижен до 10-25% от нормальных значений. Кровотока в ядре снижен до 10-12 мл/100 г/мин [3] или больше и проявляется в виде участка повышения интенсивности сигнала на диффузионно-взвешенных изображениях (с фактором взвешенности  $b=1000$ ) и снижения измеряемого коэффициента диффузии (ИКД). Ядро ишемии может быть легко распознано на ASL картах и обычно окружено областью относительно повышенного по сравнению с ядром, но все же сниженного кровотока, называемой ишемической пенумброй.

**Ишемическая пенумбра.**

Область, прилегающая к ядру ишемии, представляющая собой ткани со средним или незначительным снижением кровотока, который составляет обычно 50-75% от нормальных



**Рис. 1. Ишемическая пенумбра.**

а – ДВИ; определяются множественные инсульты пограничной зоны в левом полушарии (стрелка). б – МР-ангиограмма; определяется окклюзия левой внутренней сонной артерии. в – ASL карта; видна ишемическая пенумбра, проявляющаяся в виде зоны ишемии большей площади, чем на ДВИ [2].

**Fig. 1. Ischemic penumbra.**

DWI reveals multiple borderzone infarcts in the left cerebral hemisphere (arrow). MR angiogram (center) demonstrates a left internal carotid artery occlusion. ASL map shows the left ischemic penumbra, corresponding to the perfusion DWI mismatch.

Хроническая микрососудистая ишемия или лейкоареоз могут проявляться в виде локально сниженного или неоднородного объемного мозгового кровотока (CBF) в белом веществе при сохранном объемном мозговом кровотоке в сером веществе [2].

Участки перенесенных инсультов, сопровождающиеся энцефаломалацией, проявляются в виде выпадения сигнала на CBF картах. Выявленное снижение интенсивности ASL сигнала не всегда является признаком снижения мозгового кровотока или ишемии.

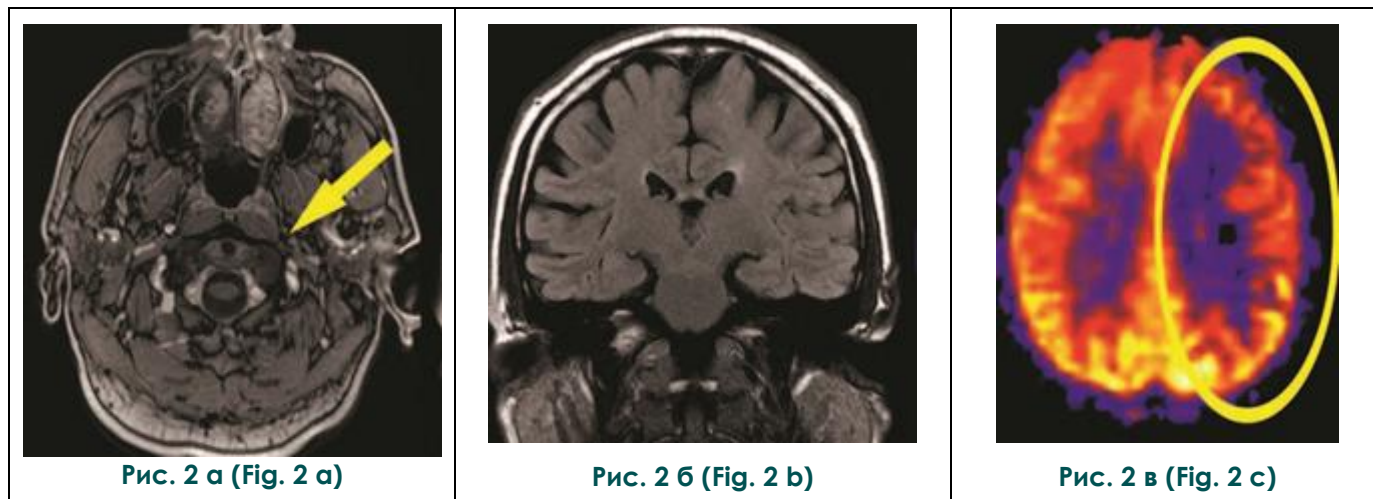
**Локальное снижение интенсивности сигнала.**

**Ишемическое ядро.**

При остром инсульте хорошо виден очаг

значений [3, 4], называется ишемической пенумброй. Размеры ишемической пенумбры варьируют в зависимости от степени развития коллатерального кровотока и времени, прошедшего с момента возникновения инсульта. Выявление ишемической пенумбры основывается на несоответствии показаний перфузионно-взвешенных и диффузионно-взвешенных изображений: на ASL картах наблюдается зона сниженного кровотока большей площади, чем очаг ишемии, выявляемый на ДВИ (рис. 1). Именно своевременно выявленная зона ишемической пенумбры наиболее хорошо поддается воздействию тромболитической терапии.

**Хроническая цереброваскулярная болезнь.**



**Рис. 2. Окклюзия сонной артерии.**

а – T1-ВИ с внутривенным контрастным усилением, аксиальная плоскость; определяется хроническая окклюзия левой внутренней сонной артерии (стрелка). б –FLAIR; признаки ишемии не наблюдаются. в – ASL карта; асимметрия кровотока (в виде эллипса) представляет собой ткани с риском ишемии в левом полушарии [2].

**Fig. 2. Carotid occlusion and tissue at risk.**

Axial contrast-enhanced spoiled gradient-recalled-echo image (left) shows chronic occlusion of the left internal carotid artery (arrow). FLAIR (center) shows no evidence of ischemia. Flow asymmetry on the ASL CBF map (ellipse) represents tissue at risk in the left cerebral hemisphere.

У пациентов со стенозом сонных артерий или другими проксимальными стенозами ткани с риском ишемии могут быть выявлены при выполнении бесконтрастной перфузии, несмотря на то, что ограничением ASL является невозможность оценить такой важный для тканей с риском ишемии параметр, как объем мозгового кровотока (Cerebral blood volume, CBV). Тем не менее, при использовании дополнительного времени маркирования могут быть получены карты среднего времени транзита крови (MTT) [5]. Если имеется относительное снижение CBF с компенсаторным повышением CBV, то будет наблюдаться асимметрия кровотока, соответствующая тканям с риском ишемии, которые могут быть спасены после установки стента или выполнения эндартерэктомии (рис. 2).

Локальное снижение интенсивности сигнала при изменениях объемного мозгового кровотока наиболее часто наблюдается в бассейнах передней и задней мозговых артерий. Изменения мозгового кровотока могут также проявляться в виде линейного повышения интенсивности сигнала в результате снижения скорости кровотока или кровоснабжения от коллатеральных сосудов. В зависимости от вариантов применения ASL последовательностей может применяться градиентный импульс для подавления сигнала от медленного тока крови в кортикальных сосудах. Благодаря отсутствию ограничений к повторению, ASL хорошо подходит для оценки цереброваскулярного резерва у таких

пациентов, что достигается путем получения CBF карт до и после ацетазоламидной или гиперкапнической нагрузки. Кроме того, методика ASL хорошо подходит для серийной оценки реваскуляризации или гиперперфузионного синдрома после выполнения эндартерэктомии [6].

**Хроническая микрососудистая ишемия.**

Локально или неоднородно сниженный кровоток в белом веществе головного мозга может выявляться на ASL картах и на анатомических МР-изображениях, и проявляется в виде участков повышения интенсивности сигнала на T2-взвешенных изображениях (T2-ВИ) и FLAIR. У пациентов с сахарным диабетом в анамнезе такие изменения сигнала могут наблюдаться в проекции семиовальных центров, несмотря на сохранность кровотока в сером веществе мозга. Тем не менее, ASL обычно не используется для оценки кровотока в белом веществе, так как методика показала недостаточно точные результаты при состояниях с низкой скоростью кровотока, а также из-за низкого соотношения сигнал/шум в белом веществе при выполнении перфузионных исследований.

**Энцефаломалация и вентрикуломегалия.**

Как правило, зоны энцефаломалации (кистозно-глиозных изменений) являются следствием перенесенного инсульта или хирургического вмешательства. Такие зоны проявляются в виде участков гипоинтенсивного сигнала на

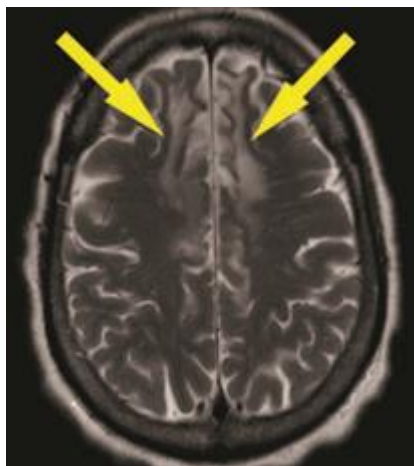


Рис. 3 а (Fig. 3 а)

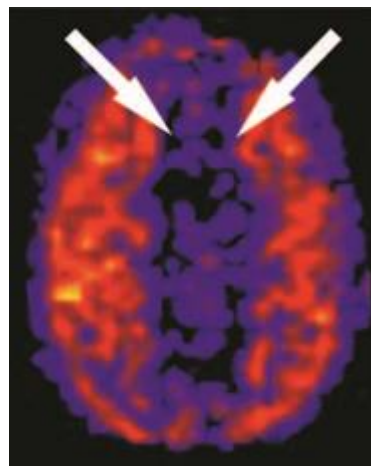


Рис. 3 б (Fig. 3 б)

**Рис. 3. Энцефаломалация.**

а – T2-ВИ, аксиальная плоскость; определяются зоны повышения интенсивности сигнала в лобных долях, соответствующие перенесенным инсультам в бассейнах передних мозговых артерий (желтые стрелки). б –ASL CBF карта; отмечается снижение кровотока в соответствующих областях (белые стрелки) [2].

**Fig. 3. Encephalomalacia.**

Axial T2-weighted image shows high signal intensity in the frontal lobes representing the remote bilateral anterior cerebral artery (ACA) territory infarcts (yellow arrows). ASL CBF map reveals corresponding focal decrease in flow in the ACA territories (white arrows).

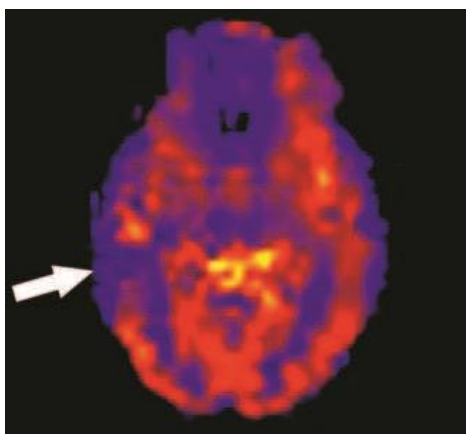


Рис. 4 (Fig. 4)

**Рис. 4. Локальное снижение перфузии при височной эпилепсии.**

ASL карта; определяется снижение интенсивности сигнала в латеральных отделах правой височной доли (стрелка) и правом гиппокампе. Пациентка, 37 лет, межприпадочный период. На электроэнцефалографии было подтверждено наличие судорожного очага

**Fig. 4. Localized hypoperfusion in temporal lobe epilepsy.**

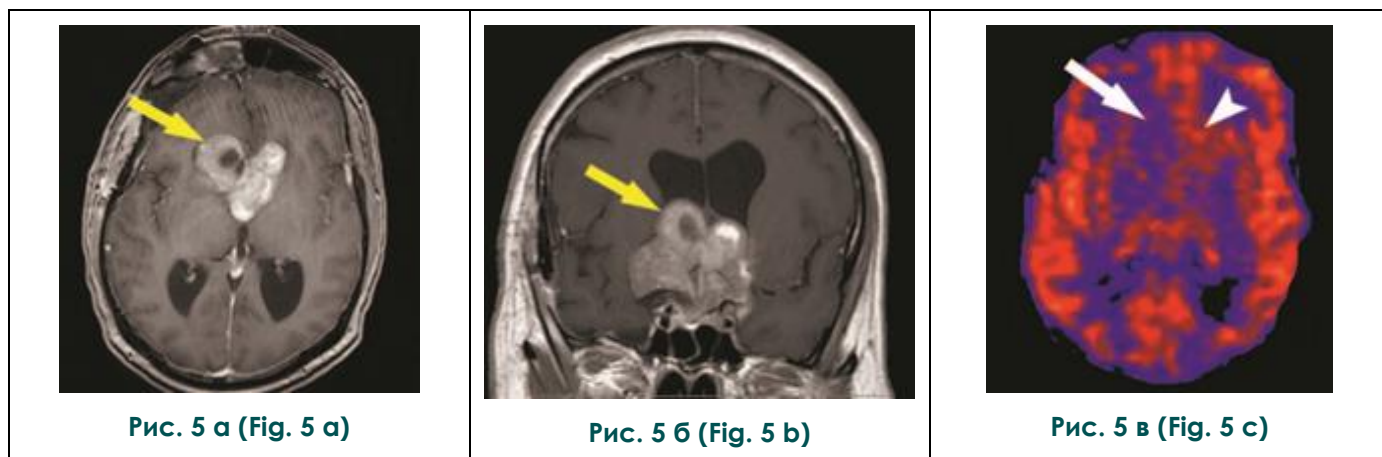
Interictal ASL CBF map in a 37-year-old woman demonstrates low signal intensity in the right lateral temporal lobe (arrow) and right hippocampus. Electroencephalography confirmed a right temporal seizure focus.

ASL CBF картах (рис. 3).

**Судорожная активность.**

Снижение перфузии часто наблюдается в эпилептогенных зонах на перфузионно-взвешенных изображениях в межприступный период. На рисунке 4 определяется асимметричное снижение интенсивности МР-сигнала в правой теменной доле у пациента с фармакорезистентной эпилепсией.

В литературе широко освещается снижение перфузии в эпилептогенных участках головного мозга и прилежащей мозговой ткани по данным однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ) в межприступный период, однако существует противоположное мнение о том, что участки головного мозга, в которых отмечается повышение перфузии во время припадка и ее снижение в межприступный период, являются эпилептогенными [7]. Как бы то ни было, снижение интенсивности ASL сигнала у пациента с эпилепсией и без очевидных факторов риска церебральной ишемии в межприступный период наводит на мысль о наличии эпилептогенного очага. Преимущество использования ASL в оценке перфузии головного мозга при эпилепсии заключается в возможности многократного использования до, во время и после припадка, а временное разрешение при ASL выше, чем при ОФЭКТ благодаря очень короткому периоду размагничивания спинов ядер водорода. Другим очевидным преимуществом ASL является возможность комплексной



**Рис. 5. Опухоль головного мозга со сниженной перфузией.**

а – Постконтрастные T1-ВИ, аксиальная плоскость, б – корональная плоскость; определяется интенсивно и неоднородно накапливающее контрастный препарат образование, распространяющееся в боковые и третий желудочки (желтые стрелки). в – ASL; отмечается снижение перфузии от отделов образования с преимущественно кистозным компонентом (стрелка) и повышение перфузии от отделов с преимущественно солидным компонентом. После хирургического лечения была подтверждена макроаденома гипофиза [2].

**Fig. 5. Hypoperfused tumor.**

Axial (left) and coronal (center) gadolinium-enhanced T1-weighted images demonstrate a heterogeneously enhancing mass invading the third and lateral ventricles (yellow arrows). ASL (right) shows regional hypoperfusion within the more cystic portion of the tumor (white arrow). The solid portions show hyperperfusion on ASL (arrowhead). The tumor proved to be a pituitary macroadenoma at surgery.

оценки изображений при сопоставлении с анатомическими МР-изображениями при диагностике мезиального височного склероза и неокортикальных эпилепсий. Судорожная активность может сопровождаться локальным или глобальным снижением перфузии (рис. 4).

#### **Новообразования.**

Опухоли головного мозга могут демонстрировать как гипер-, так и гипоперфузионные паттерны. В основном, интенсивность накопления контрастного препарата не коррелирует с перфузионным паттерном. На рисунке 5 показано отсутствие увеличения перфузии, несмотря на интенсивное накопление контрастного препарата опухолью мозга. На рисунке 6 показана неоднородно накапливающая контрастный препарат менингиома, которая при этом демонстрирует дефицит перфузии при ASL. Такой феномен может быть вызван наличием в составе опухоли обызвествлений. Низкодифференцированные глиомы обычно демонстрируют гипоперфузионные паттерны (рис. 7).

#### **Гематомы.**

Гематомы обычно проявляются в виде участков локального снижения перфузии (рис. 8), что вызвано сочетанием отсутствия васкуляризации, артефактов от продуктов метаболизма крови.

#### **Инфекция.**

Абсцессы головного мозга, как и прилежающая отечная ткань головного мозга, прояв-

ляются в виде участков снижения перфузии. Кольцевидный участок накопления контрастного препарата, окружающий абсцессы может проявляться в виде повышения интенсивности сигнала на ASL (рис. 9).

Феномен «обкрадывания» при артериовенозных мальформациях.

Для артериовенозных мальформаций (АВМ) обычно характерно повышение интенсивности сигнала на ASL. В мальформациях с высокой скоростью кровотока может возникать феномен «обкрадывания», приводящий к снижению интенсивности ASL сигнала от прилежащих к клубку тканей (рис. 10).

#### **Глобальное снижение интенсивности сигнала.**

Глобальное снижение интенсивности сигнала на перфузионно-взвешенных изображениях является частой находкой в клинической практике. Состояния со снижением кровотока, вазоспазм или воздействие различных препаратов могут приводить к снижению перфузии. Контрастные препараты на основе гадолиния являются «артефактным» фактором выраженного снижения интенсивности перфузионного сигнала.

#### **Низкий сердечный выброс.**

Основную неопределенность в абсолютной количественной оценке кровотока при ASL создает большой разброс времени транзита намагниченных спинов. Типичный набор пациентов, встречающихся в клинической практике,

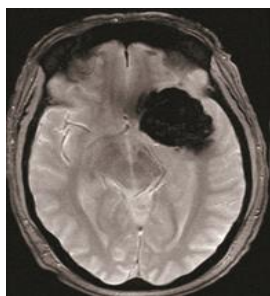


Рис. 6 а (Fig. 6 а)

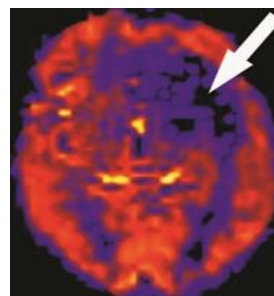


Рис. 6 б (Fig. 6 б)

**Рис. 6. Парадоксальное снижение интенсивности сигнала при ASL.**

а – T2-ВИ GRE; определяется обызвествленная опухоль, произрастающая из левого крыла клиновидной кости. При контрастном усилении отмечалось интенсивное накопление препарата данной зоной (не показано), что позволяло подразумевать менингиому. б – ASL CBF карта; несмотря на накопление контрастного препарата, отмечается снижение кровотока в опухоли (белая стрелка). Истинная гиперперфузия может быть скрыта за наложившимися артефактами от чувствительности [2].

**Fig. 6. Paradoxically low signal intensity on ASL.**

T2\*- weighted gradient-recall image reveals a calcified mass arising from the left sphenoid wing. The mass showed avid contrast enhancement (not shown) consistent with meningioma. Despite the enhancement, ASL CBF map shows no increased flow within the tumor (arrow). Underlying hyperperfusion may be masked by competing susceptibility effects.

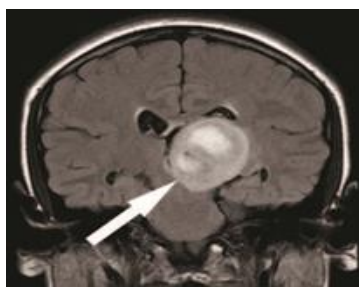


Рис. 7 а (Fig. 7 а)

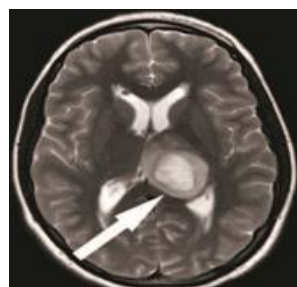


Рис. 7 б (Fig. 7 б)

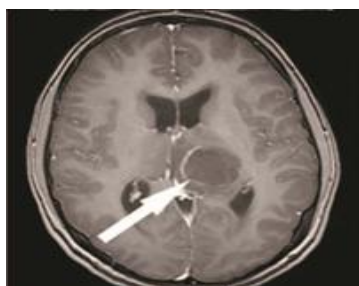


Рис. 7 в (Fig. 7 в)

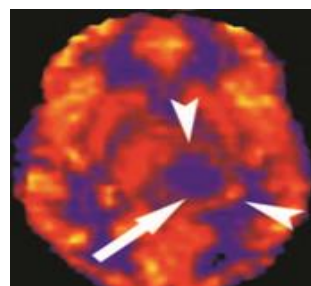


Рис. 7 г (Fig. 7 д)

**Рис. 7. Глиома с гипоперфузией на ASL.**

а – FLAIR, корональная плоскость, б – T2-ВИ, аксиальная плоскость; в области таламуса слева определяется образование, характеризующееся повышенной интенсивностью сигнала (белые стрелки). в – После контрастирования определяется незначительное накопление препарата с низкими показателями перфузии соответствующей области на ASL карте (г -снизу справа, белые стрелки). Кольцевидный участок нормальной перфузии (фигурная стрелка) вокруг образования соответствует остаточной не пораженной ткани таламуса [2].

**Fig. 7. Hypoperfused glioma on ASL.**

Coronal FLAIR (upper left) and axial T2 (upper right) images demonstrate a high-signal-intensity mass in the left thalamus (white arrows). Minimal enhancement is seen after contrast (lower left), with corresponding low perfusion on the CBF map (white arrow, bottom right). The rim of normal perfusion (arrowheads) corresponds to the residual normal tissue in the adjacent thalamus.



Рис. 8 а (Fig. 8 а)

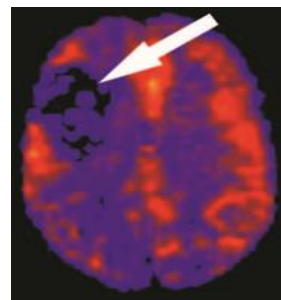


Рис. 8 б (Fig. 8 б)

**Рис. 8. Продукты метаболизма крови на ASL.**

а – КТ, аксиальная плоскость; определяется острая внутримозговая гематома в правой лобной доле (желтая стрелка). б – ASL CBF карта; локальное отсутствие сигнала (белая стрелка) соответствует области кровотечения. Обратите внимание на асимметрию глобального кровотока в виде снижения интенсивности сигнала во всех отделах правого полушария[2].

**Fig. 8. Blood products on ASL.**

Axial unenhanced CT scan reveals acute parenchymal hemorrhage in the right frontal lobe (yellow arrow). Focal loss of signal intensity on the ASL CBF map (white arrow) corresponds to the area of hemorrhage. Note flow asymmetry with decreased signal intensity throughout the right hemisphere.

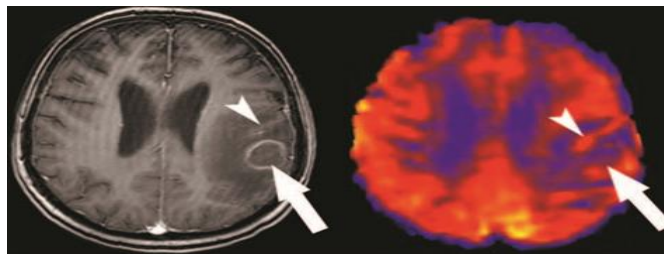


Рис. 9 а (Fig. 9 а)

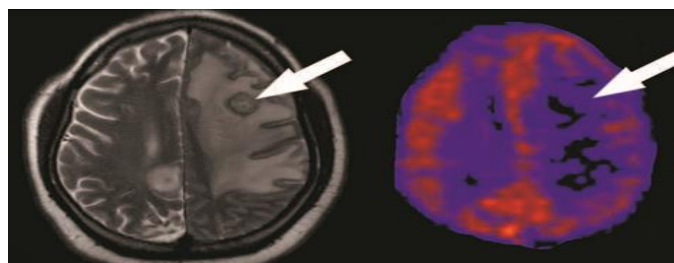


Рис. 9 б (Fig. 9 б)

**Рис. 9. Токсоплазмоз на ASL.**

а - Отмечается снижение интенсивности сигнала в области токсоплазмозного абсцесса. На постконтрастных T1-ВИ виден кольцевидный участок накопления препарата (стрелка). Зона отека, окружающая абсцесс снижает перфузию белого вещества, акцентируя нормальную перфузию прилежащих извилин. Зона повышенного ASL сигнала, окружающая абсцессы (фигурная стрелка) представляет собой нормальное серое вещество. б - Токсоплазмоз на ASL. На T2-ВИ в аксиальной плоскости определяется образование (стрелка) в левой лобной доле, окруженное зоной отека. На соответствующем ASL изображении (справа) отмечается снижение интенсивности сигнала от образования и прилежащей зоны отека (стрелка) [2].

**Fig. 9. Toxoplasmosis on ASL.**

а - Decreased perfusion to a toxoplasmosis abscess. Ring-enhancing lesion is demonstrated on corresponding postgadolinium T1-weighted image (arrow). The edema surrounding the abscess decreases the perfusion of the white matter, accentuating the normal perfusion of the adjacent gyri. The area of high signal intensity on ASL surrounding the abscess (arrowhead) represents the normal adjacent gray matter. b. Toxoplasmosis on ASL. Axial T2-weighted image (left) shows a mass with vasogenic edema in the left frontal lobe (arrow). Corresponding ASL image (right) shows diffusely decreased perfusion in the lesion and adjacent white matter (arrow).

включает индивидов с низким сердечным выбросом, аритмиями и прочими отклонениями, влияющими на получаемые данные ASL за счет измененной скорости кровотока. Таким образом, следует иметь в виду эффект от различных гемодинамических отклонений таких, как стенозы, которые могут иметь место даже без видимых изменений, особенно, когда наблюдается глобальное снижение перфузионного сигнала. Расположение маркирующих срезов непосредственно под срезом сбора данных или уменьшение расстояния между ними снижает эффект от замедленного кровотока [8, 9]. Влияние частоты сердечных сокращений и снижения

тов [10].

**Васкулит и вазоспазм головного мозга.**

Клиническое применение бесконтрастной перфузии может быть полезным в диагностике и дальнейшем наблюдении пациентов с васкулитами центральной нервной системы. На рисунке 12 показано билатеральное снижение интенсивности сигнала от полушарий головного мозга у молодого пациента с каннабиноидным васкулитом центральной нервной системы.

Вазоспазм, возникающий после субарахноидальных кровоизлияний, наблюдается более чем у трети обследованных пациентов и практически всегда наблюдается у пациентов с кро-

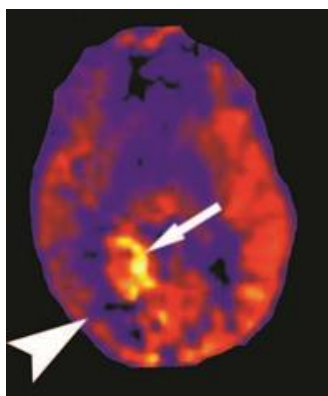


Рис. 10 а (Fig. 10 а)

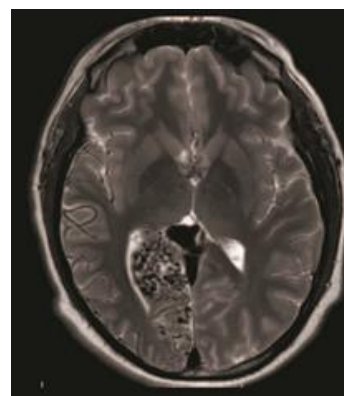


Рис. 10 б (Fig. 10 б)

**Рис. 10. Феномен «обкрадывания» при АВМ.**

На ASL карте определяется характерное повышение интенсивности сигнала соответствующее артериовенозной мальформации (стрелка). Также, видна расположенная в прилежащих отделах зона гипоперфузии, представляющая собой сопутствующий феномен обкрадывания [2].

**Fig. 10. Blood steal phenomenon associated with AVM.**

ASL CBF map shows characteristic hyperperfusion corresponding to the AVM (arrow). Also seen is a regional zone of hypoperfusion representing the associated steal phenomenon (arrowhead).

сердечного выброса на получаемые ASL данные требует дальнейшего изучения.

**Возрастные изменения и атрофия мозга.**

Расширение ликворных пространств, связанное с возрастными дегенеративными изменениями головного мозга, является распространенной причиной глобального снижения интенсивности ASL сигнала в типичной клинической популяции (рис. 11). Если у пациента с дегенеративно-атрофическими изменениями головного мозга, выявленными при анатомической МРТ, не наблюдается соответствующего снижения перфузии при ASL, то следует подразумевать наличие скрытых факторов повышения перфузии таких, как гиперкапния или перенесенный ишемический инсульт. Снижение интенсивности перфузионного сигнала, связанное с возрастными изменениями, подробно описано в литературе и должно учитываться при интерпретации ASL изображений у пожилых пациен-

тов. В исследованиях Leclerc et al. [11] при выполнении ОФЭКТ головного мозга было выявлено глобальное снижение перфузии у 10 из 11 пациентов с вазоспазмом, что говорит о большей чувствительности данного метода, чем МРТ с внутривенным контрастным усилением. Комплексный подход в МРТ диагностике вазоспазма может быть дополнен ASL, что повысит временную эффективность.

**Экзогенные факторы.**

Еще один эффект, который следует иметь в виду при глобальном снижении перфузии головного мозга – это воздействие экзогенных факторов таких, как кофеин, который известен своей способностью снижать перфузию за счет воздействия на аденозиновые рецепторы капилляров мозга. Растущее количество данных говорит о том, что следует контролировать использование кофеина при выполнении перфузионных исследований, таких как BOLD или



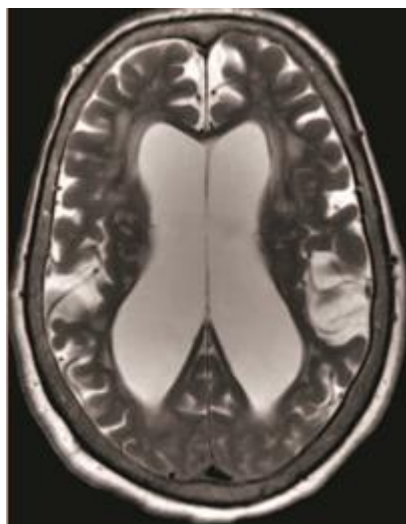


Рис. 11 а (Fig. 11 а)

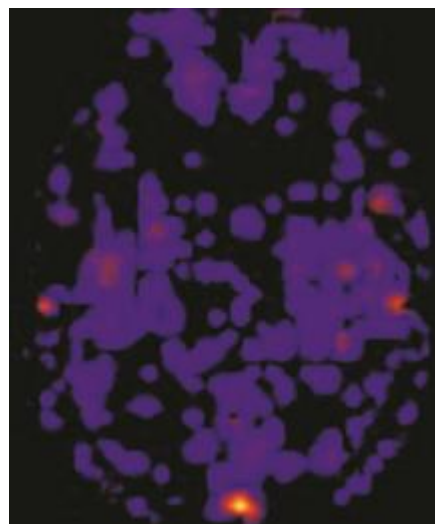


Рис. 11 б (Fig. 11 б)

**Рис. 11. Глобальное снижение ASL сигнала в результате атрофии мозга.**

а – T2-ВИ; определяются атрофические изменения головного мозга в виде смешанной заместительной гидроцефалии и гиперинтенсивных изменений белого вещества (глиоз). б – ASL карта; отмечается повсеместное снижение перфузионного сигнала [2].

**Fig. 11. Cerebral atrophy as a cause of globally decreased ASL signal intensity.**

T2-weighted image (left) reveals advanced cerebral volume loss, ex vacuo ventricular enlargement, and white matter hyperintensities. ASL map demonstrates poor perfusion signal intensity throughout.

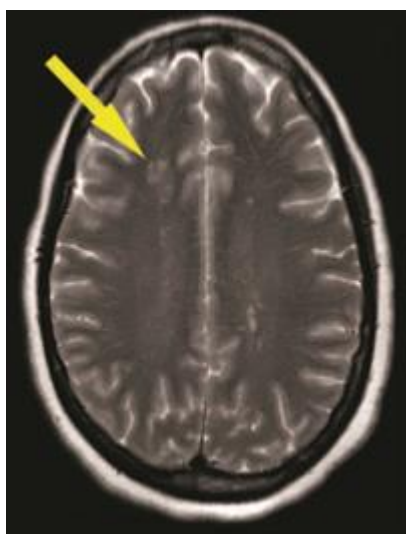


Рис. 12 а (Fig. 12 а)

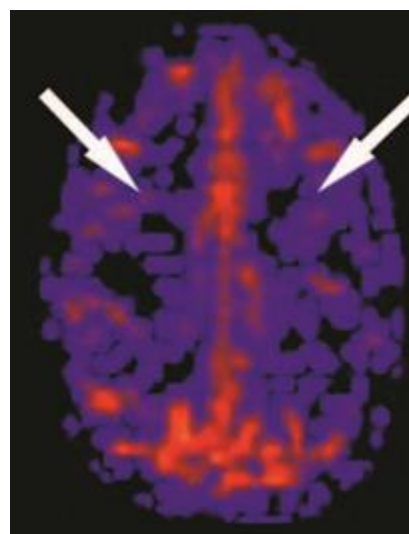


Рис. 12 б (Fig. 12 б)

**Рис. 12. Билатеральное снижение перфузии при васкулите центральной нервной системы.**

а – T2-ВИ; определяются множественные участки измененного сигнала в белом веществе головного мозга (желтая стрелка). б – ASL CBF карта; отмечается билатеральное снижение интенсивности сигнала от полушарий головного мозга (белые стрелки). Пациентка, 38 лет, васкулит ЦНС [2].

**Fig. 12. Bilateral hypoperfusion in CNS vasculitis.**

Multiple white matter lesions are shown on the T2-weighted image (yellow arrow). ASL CBF map demonstrates symmetrically decreased signal intensity in the bilateral cerebral hemispheres (white arrows) in a 38-year-old woman with CNS vasculitis.

ASL [12 - 14]. При применении некоторых антигипертензивных препаратов и кокаина также отмечалось глобальное снижение перфузии, однако при курсовом лечении гипертензии изменения перфузии не наблюдались [6, 7].

**Смерть мозга.**

ASL является информативным методом диагностики состояний, сопровождающихся гипоперфузией. Тем не менее, несмотря на потенциальную возможность использования ASL вместо инвазивных методик, чувствительность к движению и неспособность к полной сатурации сигнала от мягких тканей мозга, маскирующих истинную перфузию, делают ASL непригодным к использованию для диагностики смерти мозга. Констатация смерти мозга, основанная на ASL данных, должна быть обязательно дополнена данными клинической картины и других методов визуализации [15].

**Паттерны гиперперфузии.**

**Локальное повышение интенсивности сигнала.**

Локальное повышение интенсивности сигнала при ASL может быть связано как с истинной гиперперфузией, так и с различными артефактами. ASL является чувствительным методом определения гиперперфузии при различных состояниях таких, как инсульты, опухоли, судороги или снижение сосудистой ауторе-

гуляции. Регионарная гиперперфузия, сопровождающая гипертензивную энцефалопатию, синдром задней обратимой энцефалопатии и связанные синдромы [16], может быть выявлена с помощью ASL, которая при серийном наблюдении может демонстрировать динамические изменения перфузии с течением времени. Относительное повышение интенсивности сигнала может так же быть следствием регионарного или долевого распределения кровотока в определенных нормальных физиологических условиях таких, как активация зрительной коры затылочных долей.

**Сверхперфузия.**

Локальная дисфункция ауторегуляции сопровождается инсультом и часто визуализируется на анатомических МР-томограммах в виде внутрисосудистого усиления в области зоны поражения [17]. Замедленный транзит маркированных спинов в области инсульта может проявляться в виде повышения интенсивности сигнала. К другим причинам снижения ауторегуляторной функции относятся: синдром задней обратимой энцефалопатии и синдром гиперперфузии после каротидной эндартериэктомии [18]. ASL очень чувствительна к состояниям сверхперфузии, которые проявляются в виде участков повышения интенсивности сигнала (рис. 13). При тяжелом течении синдрома задней обратимой

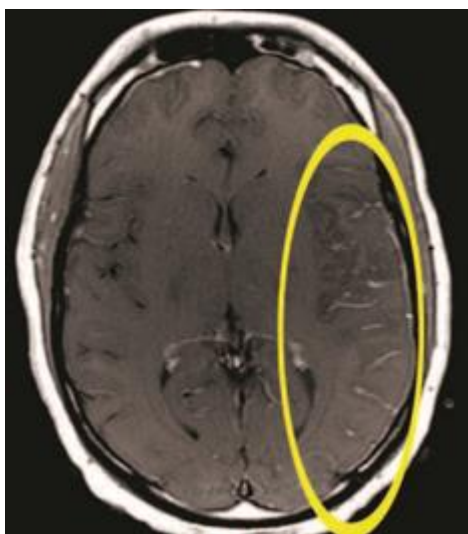


Рис. 13 а (Fig. 13 а)

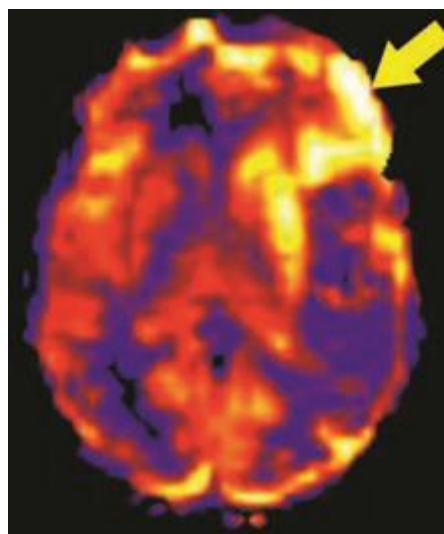


Рис. 13 б (Fig. 13 б)

**Рис. 13. Сверхперфузия.**

а – T1-ВИ с внутривенным контрастным усилением; асимметричное усиление кортикальных сосудов на крупном участке бассейна левой средней мозговой артерии после инсульта (эллипс). б –ASL CBF карта; определяется повышение сигнала от области островка, хвостатых ядер и левой лобной доли (стрелка) с наличием гипоперфузии расположенных кзади областей [32].

**Fig. 13. Luxury perfusion.**

Asymmetric intravascular enhancement of the cortical vessels in a large infarcted left MCA territory (ellipse) on the postcontrast T1-weighted images. ASL CBF map demonstrates hyperperfusion in the left caudate, insula, and frontal lobe (arrow). The posterior parietal regions are hypoperfused.

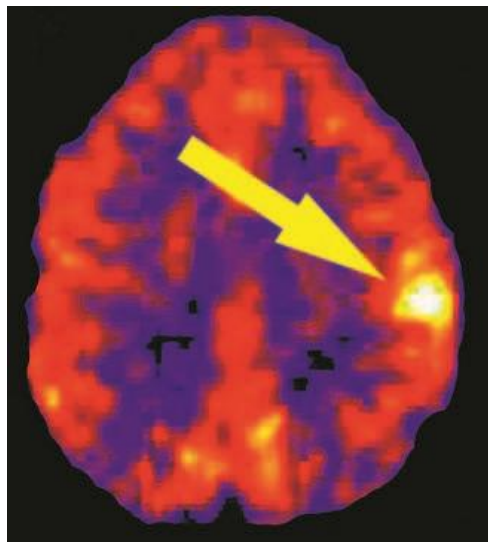


Рис. 14 (Fig. 14)

**Рис. 14. Реперфузия.**

ASL CBF карта, через 12 часов после применения активатора тканевого плазминогена определяется участок локального повышения перфузии в бассейне левой средней мозговой артерии (стрелка). В остальных отделах левого полушария перфузия сохранена [32]. Пациентка, 80 лет, правосторонний гемипарез после применения системных тромболитиков.

**Fig. 14. Reperfusion.**

An 80-year-old woman presenting with right hemiparesis met the criteria for systemic thrombolytics. ASL CBF map acquired approximately 12 hours after tissue plasminogen activator administration reveals localized hyperperfusion within the left MCA territory (arrow). Perfusion is otherwise preserved throughout the left hemisphere.

энцефалопатии начальная гиперперфузия может спровоцировать инфаркт с последующим билатеральным теменно-затылочным перфузионным дефицитом. Сопутствующее внутримозговое кровоизлияние может давать артефакт от чувствительности, имитируя гипоперфузию.

**Реперфузия.**

Так как при выполнении ASL не возникают артефакты из-за рециркуляции меченых спинов, методика хорошо подходит для серийной оценки перфузии головного мозга при инсультах и может служить источником информации о реперфузии. Восстановление кровотока в ишемическом ядре и пенумбре проявляется как повышение интенсивности сигнала на ASL картах после спонтанной реканализации тромбированного сосуда, применения тромболитиков или активации коллатерального кровотока. Такие участки реперфузии отличаются от застойных внутрисосудистых магнитных спинов, так как обычно соответствуют таким ана-

томическим структурам, как базальные ядра, островок, таламус или кортикальные извилины. На рисунке 14 представлена локальная гиперперфузия в бассейне левой средней мозговой артерии через 12 часов после применения системных тромболитиков, а на рисунке 15 показана спонтанная реперфузия в области перенесенного инсульта.

**Судорожная активность.**

Судорожная активность может имитировать острый инсульт как на изображениях, так и клинически. При отсутствии изменений на диффузионно-взвешенных и анатомических МР-изображениях, наличие зоны локального повышения интенсивности сигнала на ASL картах может свидетельствовать как о сложных парциальных судорогах в постприпадочном периоде (рис. 16), так и о реканализации тромбированного сосуда с последующей реперфузией в случае подострого инсульта. Чаще всего клиническая картина позволяет провести дифференциальный диагноз между этими состояниями. Чувствительность ОФЭКТ в выявлении гиперперфузии при височной эпилепсии в припадочный период достигает 90%. В работе, выполненной Lee et al. [19], повышение интенсивности сигнала в эпилептогенной зоне в поздний постприпадочный период было выявлено более чем у половины обследованных пациентов с судорогами. Преимущество ASL заключается в возможности сбора данных анатомических и перфузионных изображений в одинаковых условиях. Механизм повышения перфузии при судорогах изучен недостаточно, но может быть связан с транзиторной потерей ауторегуляторной функции прилежащих сосудов или с выбросом таких нейростимуляторов, как глутамат, в зоне нервного возбуждения [19]. В диагностике судорог ASL дополняет традиционные исследования такие, как электроэнцефалографию, анатомические МР-изображения и ядерные методы.

**Опухоли.**

Оценка опухолей с помощью ASL и корреляция между кровотоком и степенью злокачественности описаны в литературе [20, 21]. Возможность количественной оценки перфузии с помощью ASL позволяет оценивать эффективность лечения опухолей. Помимо этого, ASL помогает дифференцировать рецидив опухоли и постлучевые некротические изменения. Для других перфузионных методик, основанных на болюсном введении контрастных препаратов, требуются сложные и дорогостоящие автоматические инъекторы, а также отсутствие патологии почек у пациента. У пациентов с метастатическим поражением или первичными опухолями почек, подвергшимися химиотерапевтическому лечению, а также у пациентов с почечной недостаточностью использование классиче-

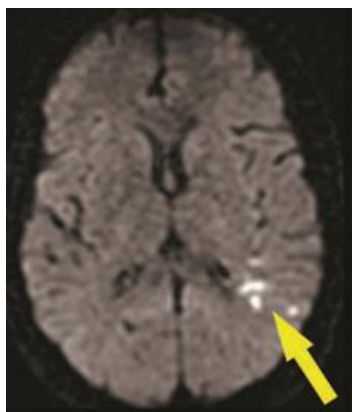


Рис. 15 а (Fig. 15 а)

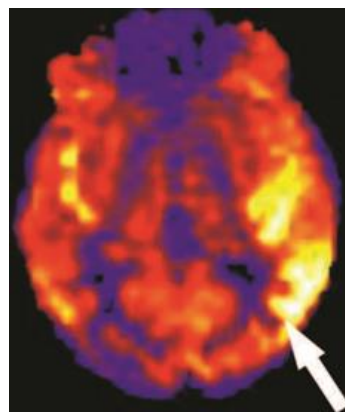


Рис. 15 б (Fig. 15 б)

**Рис. 15. Участок перенесенного инсульта с гиперперфузией на ASL.**

а – ДВИ; определяются лакунарные участки повышения сигнала на диффузионно-взвешенных изображениях (желтая стрелка). б – ASL карта; определяется гиперперфузия извилин в левом полушарии (белая стрелка). В бассейне задней мозговой артерии определяется снижение перфузии [32]. Пациентка, 73 года, фибрилляция предсердий и тромбэмболические инсульты в бассейне левой задней мозговой артерии.

**Fig. 15. Hyperperfused stroke territory on ASL.**

A 73-year-old woman with atrial fibrillation and embolic infarcts in the left posterior cerebral artery and posterior watershed territories. Punctate areas of restricted diffusion are seen (left, yellow arrow). ASL map (right) shows gyrat hyperperfusion in the left hemisphere (white arrow). Hypoperfusion is also seen in the right posterior watershed territory.

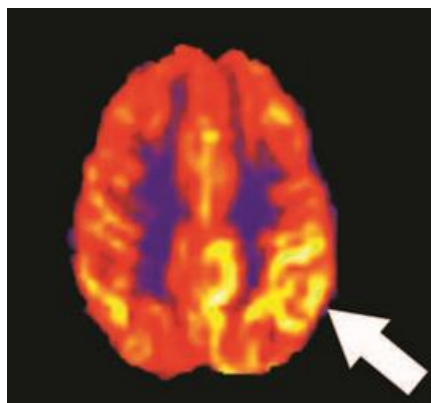


Рис. 16 а (Fig. 16 а)

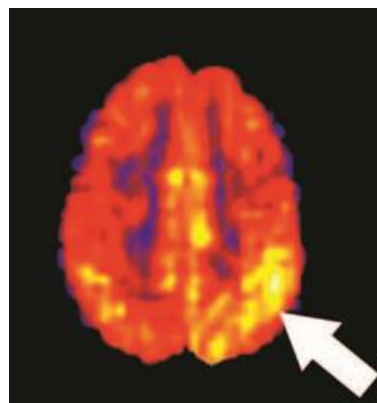


Рис. 16 б (Fig. 16 б)

**Рис. 16. Гиперперфузия в зоне судорожной активности.**

Мальчик, 6 лет, с синдромом Ландау-Клеффнера, проявляющимся сложными парциальными судорогами, приводящими к парезу правой половины лица и правой руки. а, б – ASL карты; определяется локальное повышение перфузии в левой теменной доле, связанное с периодом припадка (стрелка). При выполнении ЭЭГ подтвердилась продолжительная судорожная активность в левом полушарии головного мозга. На ДВИ с фактором взвешенности  $b=1000$  изменений выявлено не было (не показано). Выраженность симптомов уменьшилась после назначения противоэпилептической терапии и курса внутривенного введения иммуноглобулина [32].

**Fig. 16. Hyperperfused seizure territory.**

A 6-year-old boy with a history of Landau-Kleffner syndrome who presented with complex partial seizures causing paresis of the right face and upper extremity. ASL shows regional hyperperfusion in the left parietal hemisphere associated with the ictal phase of seizure activity (arrows). EEG confirmed almost continuous seizure activity within the left hemisphere. Findings of the diffusion-weighted sequence were normal (not shown). Symptoms improved on antiepileptic medications and a course of intravenous immunoglobulin.

ской перфузионной методики с использованием сложной перфузионной аппаратуры может быть невозможным. Кроме того, благодаря отсутствию контрастного вещества, при применении ASL исключается возникновение такого осложнения, как системный нефрогенный фиброз. Наличие хирургических пластин, устанавливаемых после краниотомии, препятствует выполнению МР-перфузии из-за возникновения выраженных артефактов. Однако с модернизацией хирургических материалов перфузионная оценка прилежащих к пластинам участков головного мозга становится все более информативной.

На рисунках 17-19 показано повышение мозгового кровотока на ASL при менингиоме, мультиформной глиобластоме и эпендимальных метастазах соответственно. Несоответствие картины на T1-ВИ с контрастным усилением и ASL может означать наличие опухолей с диффузным инфильтративным ростом таких, как глиоматоз (рис. 20). Отсутствие повышения перфузии в области неопластического процесса на ASL требует исключения наличия артефактов, так как локальные артефакты от чувствительности, продукты метаболизма крови или эффект маски могут скрывать гиперперфузию в пораженных участках.

#### **Сосудистые мальформации.**

Локальная гиперперфузия может возникать при наличии сосудистых мальформаций, а ее выраженность зависит от типа и калибра вовлеченных сосудов, а также от скорости кровотока в клубке. Гиперперфузия может иметь место как при мальформациях, так и при венозных ангиомах (рис. 21). Кроме того, при выполнении ASL можно выявить состояния гиперемии или ишемии прилежащих к клубку тканей мозга как в до-, так и в послеоперационный периоды [22, 23].

#### **Локальные нарушения ауторегуляции.**

Синдром задней обратимой энцефалопатии или похожие синдромы могут возникать как изолированно, так и сопровождать различные патологические состояния такие, как неконтролируемая гипертензия, эклампсия, отравление циклоспоринами, а также являться осложнениями при некоторых химиотерапевтических схемах лечения [24, 25]. Потеря ауторегуляторной функции приводит к возникновению данных синдромов, а попытки поддержания перфузионного давления сводятся к вазоконстрикции артериол. После этого возникает гиперперфузия, приводящая к отеку, чаще всего встречающемуся в вертебробазиллярном бассейне из-за относительно скудной периваскулярной симпатической иннервации в этой области [26]. На рисунке 22 показаны изменения перфузии с течением времени у 31-летнего пациента с синдромом задней обратимой энцефа-

лопатии, включающие изначальную вазоконстрикцию и гипоперфузию, возникающую в виде обратной реакции после гиперперфузии. ASL является эффективным методом оценки синдромов, сопровождающихся гиперперфузией, благодаря возможности многократного повторения и чувствительности к повышению кровотока. На рисунке 23 показан случай синдрома гиперперфузии после односторонней каротидной эндартерэктомии. Этот феномен хорошо описан с использованием других перфузионных методик [27], предположительно возникает из-за потери ауторегуляторной функции.

#### **Глобальное повышение интенсивности сигнала.**

Повышение интенсивности сигнала на ASL может носить глобальный характер и быть следствием физиологических, патологических состояний и артефактов. Дети и некоторые здоровые взрослые с богатым кровоснабжением головного мозга могут служить примером истинного физиологического глобального повышения кровотока. Патологические состояния такие, как гиперкапния и гипоксия, могут приводить к потере контроля над ауторегуляцией и резкой гиперперфузии, похожей на «суперяркое изображение». Наконец, при выявлении неожиданно повышенной перфузии следует исключить наличие артефактов.

#### **Богатое кровоснабжение.**

Кровоток в головном мозге может сильно различаться в клинической популяции, даже среди здоровых индивидов. Несмотря на то, что диапазон значений нормального кровотока в сером веществе, по данным литературы, составляет 40-70 мл/100 г/мин [28], диффузно-повышенная интенсивность сигнала при ASL может наблюдаться и у здоровых индивидов. У детей практически во всех случаях отмечается повышение кровотока в норме.

#### **Глобальная гиперперфузия головного мозга.**

Глобальная гиперперфузия головного мозга возникает как осложнение после инсульта, эндартерэктомии и травм головы [27, 29]. Быстрое восстановление кровотока выше нормальных значений может приводить к потере ауторегуляции и приводить к глобальному повышению перфузии. Постишемическая гиперемия головного мозга является известным феноменом и считается следствием воздействия тройничного нерва [30]. На рисунке 24 показан случай парадоксального глобального повышения мозгового кровотока на ASL при наличии множественных участков снижения диффузии у пациента с кардиопульмональным шоком.

#### **Гиперкапния.**

Гиперкапния является сильным стимулом для расширения сосудов головного мозга. Ги-

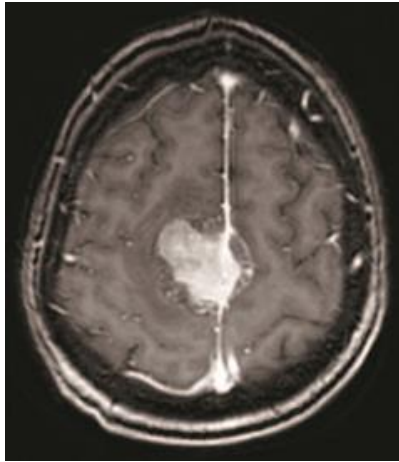


Рис. 17 а (Fig. 17 а)

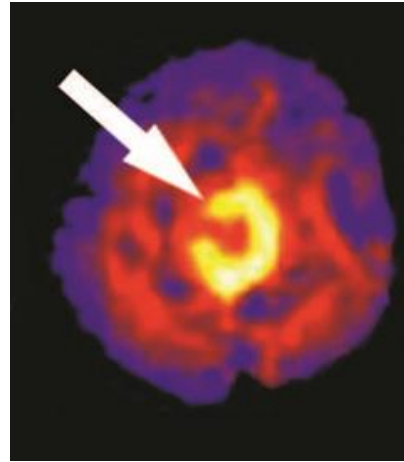


Рис. 17 б (Fig. 17 б)

**Рис. 17. Атипичная менингиома.**

а – T1-ВИ, постконтрастное, аксиальная плоскость; определяется интенсивно накапливающая контрастный препарат опухоль с расположением широкого основания в области серпа. б – ASL карта; отмечается кольцевидное повышение перфузии, соответствующее наружным краям опухоли (стрелка) [32]. Женщина, 57 лет.

**Fig. 17. A 57-year-old woman with atypical meningioma.**

An avidly enhancing falxine-based mass is demonstrated on the postgadolinium image (left). ASL map demonstrates ringlike hyperperfusion corresponding to the outer margins of the tumor (right, arrow).

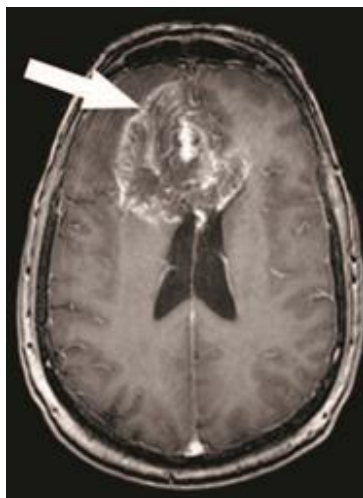


Рис. 18 а (Fig. 18 а)

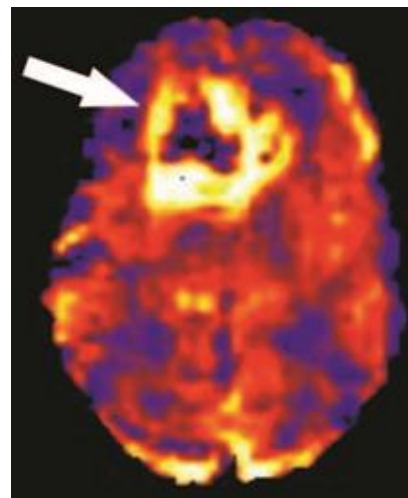


Рис. 18 б (Fig. 18 б)

**Рис. 18. Гиперперфузия в области мультиформной глиобластомы.**

а – T1-ВИ с контрастным усилением, аксиальная плоскость; отмечается выраженное накопление контрастного препарата высокодифференцированным новообразованием с центром роста в области колена мозолистого тела. б – ASL CBF карта; определяется повышение интенсивности сигнала, соответствующее повышенной кровотоку в периферических отделах опухоли [32].

**Fig. 18. Hyperperfusion of a glioblastoma multiforme.**

Axial postgadolinium T1-weighted image demonstrates avid enhancement of a high-grade neoplasm centered in the genu of the corpus callosum. ASL CBF map demonstrates high signal intensity corresponding to increased flow within the periphery of the tumor (arrow).

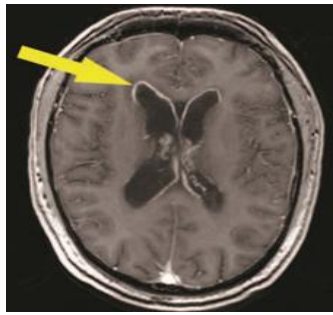


Рис. 19 а (Fig. 19 а)

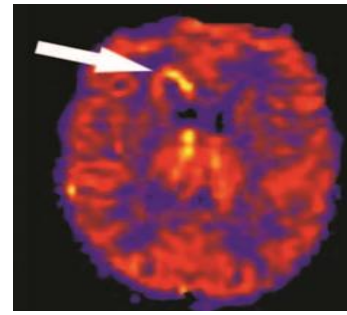


Рис. 19 б (Fig. 19 б)

**Рис. 19. Гиперперфузия эпендимальной опухоли.**

а – T1-ВИ GRE с контрастным усилением, аксиальная плоскость; отмечается диффузное накопление контрастного препарата эпендимальными поверхностями (желтая стрелка). б – ASL; определяется гиперперфузия стенки переднего рога правого желудочка (белая стрелка). Дальнейшее обследование выявило метастазы меланомы в мягких мозговых оболочках [32].

**Fig. 19. Ependymal tumor hyperperfusion.**

Gadolinium-enhanced spoiled gradient-recalled image shows diffuse enhancement of the ependymal surfaces (yellow arrow). Representative ASL image demonstrates hyperperfusion outlining the right lateral ventricle (white arrow). CSF analysis revealed leptomeningeal seeding of metastatic melanoma.

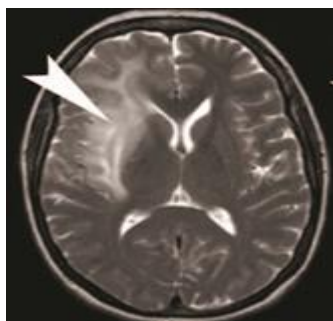


Рис. 20 а (Fig. 20 а)

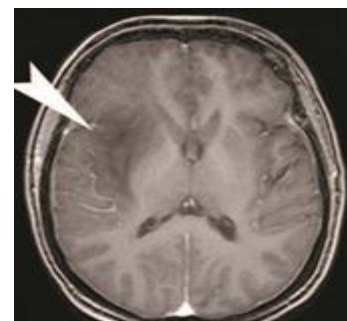


Рис. 20 б (Fig. 20 б)

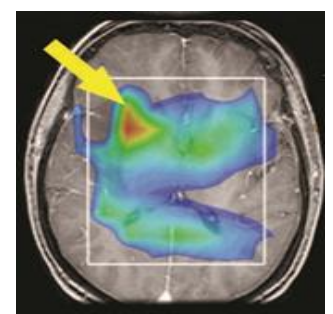


Рис. 20 в (Fig. 20 в)

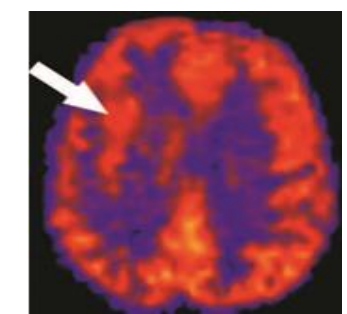


Рис. 20 г (Fig. 20 г)

**Рис. 20. Гиперперфузия опухоли с инфильтративным ростом на ASL**

а, б – T2-ВИ и T1-ВИ соответственно; в правой лобной доле определялись гиперинтенсивные патологические изменения с инфильтративным распространением и слабым накоплением контрастного препарата на постконтрастных T1-ВИ (фигурные стрелки). в – мультисексельная МР-спектроскопия; было выявлено повышение соотношения холин/креатинин до 3:2, что соответствует церебральному глиоматозу (желтая стрелка). г – ASL карта; определяется повышение интенсивности сигнала в субкортикальных отделах правой лобной доли, что соответствует выявленному образованию [32]. Пациентка, 49 лет, с судорогами.

**Fig. 20. ASL hyperperfusion in infiltrative tumor.**

A 49-year-old woman who presented with seizures had an infiltrative T2 (upper left) hyperintense lesion in the right frontal lobe without significant enhancement on postgadolinium T1-weighted imaging (arrowheads). Multivoxel MR spectroscopy (bottom left) reveals an elevated choline/creatine ratio (3:2) consistent with gliomatosis cerebri (yellow arrow). ASL CBF map (bottom right) demonstrates increased signal intensity in the subcortical white matter corresponding to tumor (white arrow).

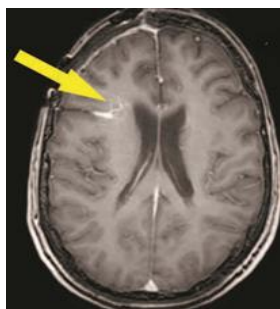


Рис. 21 а (Fig. 21 а)

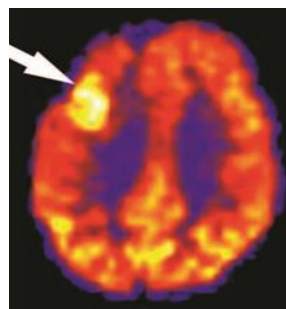


Рис. 21 б (Fig. 21 б)

**Рис. 21. Гиперперфузия извилин при венозной ангиоме.**

а – T1-ВИ, постконтрастное, обнаружена венозная ангиома (желтая стрелка). б – ASL карта; было выявлено повышение интенсивности сигнала от прилежащих извилин (белая стрелка) [32]. Пациентка, 41 год.

**Fig. 21. Gyral hyperperfusion with venous angioma.**

41-year-old woman. Incidentally noted is a venous angioma on the postgadolinium spoiled gradient-recalled sequence (yellow arrow) and bandlike cortical high signal intensity on the ASL map (white arrow).

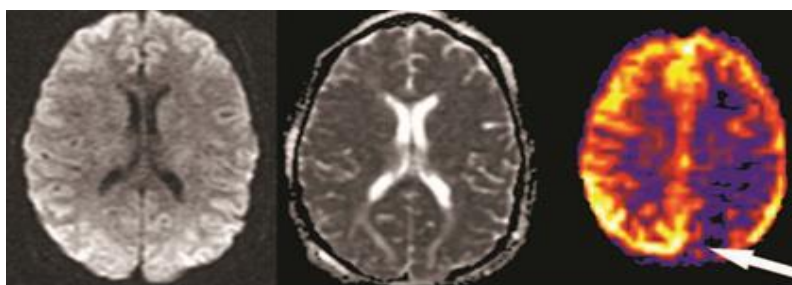


Рис. 22 а (Fig. 22 а)

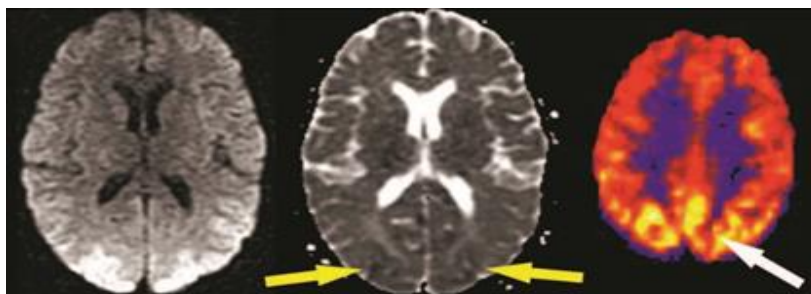


Рис. 22 б (Fig. 22 б)

**Рис. 22. Изменения перфузии с течением времени у 31-летнего пациента с синдромом задней обратимой энцефалопатии.**

а - Первичные изображения: повышение интенсивности сигнала на диффузионно-взвешенных изображениях (слева) представляет собой артефакт от исходной намагниченности T2 ("shinethrough"), возникающий в результате отека в кортикальных отделах затылочных долей, который виден на ИКД картах (в центре). На соответствующей ASL карте (справа) определяется скрытая асимметрия кровотока с наличием гипоперфузии в левой затылочной доле (белая стрелка). б - Через 2 недели на диффузионно-взвешенных изображениях, ИКД карте отмечаются новые участки снижения диффузии (желтые стрелки), а на соответствующей ASL карте отмечается билатеральная гиперперфузия (белая стрелка) [32].

**Fig. 22. Evolution of perfusion changes in PRES in a 31-year-old woman.**

A, Initial images: high signal intensity on the initial diffusion-weighted image (left) represents T2 shinethrough secondary to edema seen on the apparent diffusion coefficient (ADC) images (center) in the occipital cortices. A corresponding ASL map (right) reveals marked flow asymmetry with hypoperfusion in the left occipital lobe (white arrow). B. At 2-week follow-up, diffusion and ADC images show new posterior restricted diffusion (yellow arrows), and bilateral hyperperfusion is now evident on perfusion images (white arrow).



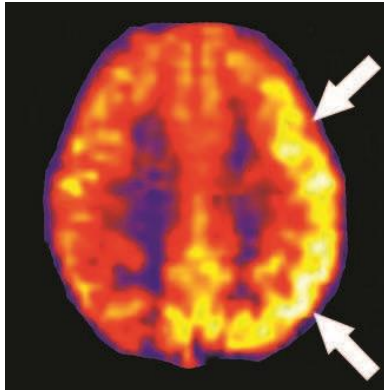


Рис. 23 (Fig. 23)

**Рис. 23.** Синдром гиперперфузии после эн-  
дартерэктомии.

ASL карта, полученная через 2 дня после левосторон-  
ней эндартерэктомии у пациента с жалобами на го-  
ловокружение. Отмечается значительное повышение  
кровотока в левом полушарии (белые стрелки) [32].

**Fig. 23.** Cerebral hyperperfusion after carotid  
endarterectomy.

ASL CBF map obtained 2 days after left CEA for dizzy-  
ness demonstrates markedly increased flow throughout  
the left hemisphere (arrows).

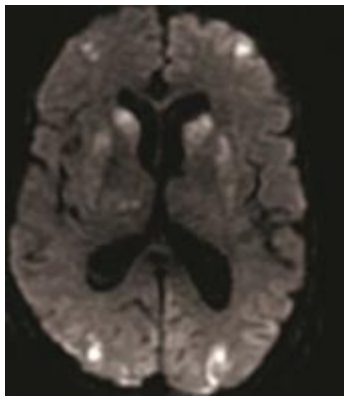


Рис. 24 а (Fig. 24 а)

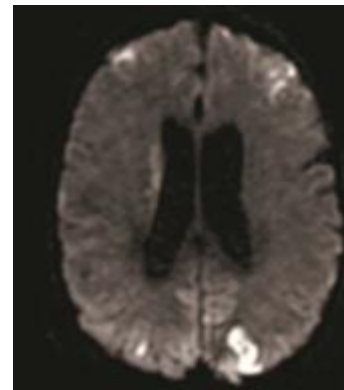


Рис. 24 б (Fig. 24 б)

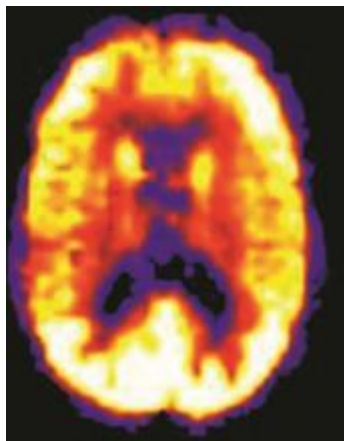


Рис. 24 в (Fig. 24 в)

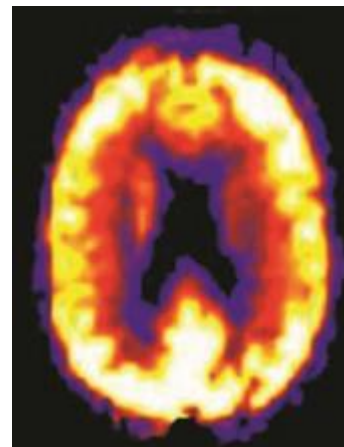


Рис. 24 г (Fig. 24 г)

**Рис. 24.** Парадоксальная гиперперфузия после многоочагового ишемического инсульта.

а, б – ДВИ; в области базальных ядер с обеих сторон определяются множественные участки повышения ин-  
тенсивности сигнала. в, г – ASL карты; отмечается выраженное глобальное повышение мозгового кровотока  
[32]. Пациентка, 69 лет, ишемический инсульт.

**Fig. 24.** Paradoxical hyperperfusion following diffuse anoxic insult.

A 69-year-old woman. Diffusion-weighted image reveals multiple infarcts in the bilateral basal ganglia and water-  
shed zones (top). ASL maps (bottom) show global hyperperfusion consistent.



Рис. 25 а (Fig. 25 а)

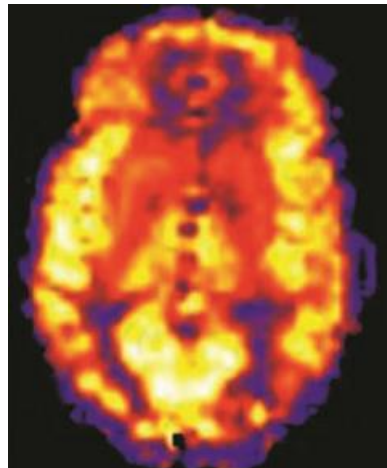


Рис. 25 б (Fig. 25 б)

**Рис. 25. Гиперкапния.**

а – Рентгенограмма органов грудной клетки, прямая проекция. Пациент, 77 лет, тяжелый отек легких и  $PCO_2 \text{ \%} = 76$  (при нормальных значениях 35-45). б –ASL карта; отмечается усиление кровотока во всех отделах коры головного мозга [32].

**Fig. 25. Hypercapnia.**

A 77-year-old patient with severe pulmonary edema (left) and a  $PCO_2$  of 76 mm Hg (normal range, 35–45 mm Hg) at the time of MR imaging. Globally increased gray matter flow is shown on the ASL CBF map (right).

перкапническая нагрузка использовалась в многочисленных клинических исследованиях для увеличения глобальной скорости объемного мозгового кровотока и оценки цереброваскулярного резерва [28, 31]. Исследования показали, что даже незначительное увеличение парциального давления углекислого газа в конце выдоха на 5-8 мм рт. ст. приводит к ощутимому повышению значений мозгового кровотока. В клинической популяции к состояниям, приводящим к нарушению газового обмена, относятся такие заболевания, как хроническая обструктивная болезнь легких, респираторный дистресс-синдром взрослых и отек легких. У таких пациентов парциальное давление может превышать нормальные значения на 30 мм рт. ст. и более, значительно усиливая мозговой кровоток. На рисунке 25 показан случай аномального глобального повышения мозгового кровотока у пациента с тяжелым отеком легких и выраженной гиперкапнией ( $PCO_2 \text{ \%} = 76$ ).

**Заключение.**

Таким образом, ASL – это стремительно развивающийся неинвазивный метод МР-перфузии, который показывает многообещающие результаты при использовании в клинической практике. Клинические данные ASL могут быть классифицированы по отдельным паттернам на основе распределения интенсивности сигналов гипер- и гипоперфузии. Данные изменения в совокупности с анамнезом, клиническими данными и данными других инструментальных методов диагностики дают исчерпывающую информацию о состоянии пациента, что позволяет своевременно и правильно поставить диагноз и начать лечение.

**Источник финансирования и конфликт интересов.**

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

**References:**

1. Wolf RL, Alsop DC, McGarvey ML, et al. Susceptibility contrast and arterial spin labeled perfusion MRI in cerebrovascular disease. *J Neuroimaging* 2003; 13:17–27
2. Deibler AR, Pollock JM, Kraft RA, et al. Arterial spin-labeling in routine clinical practice, Part 2: Hypoperfusion patterns. *AJNR Am J Neuroradiol* 2008; 29:1235– 41
3. Astrup J, Siesjo BK, Symon L. Thresholds in cerebral ischemia: the ischemic penumbra. *Stroke* 1981;12:723–25
4. Schlaug G, Benfield A, Baird AE, et al. The ischemic penumbra: operationally defined by diffusion and perfusion MRI. *Neurology* 1999;53:1528 –37
5. Wang J, Alsop DC, Song HK, et al. Arterial transit time imaging with flow encoding arterial spin tagging (FEAST). *Magn Reson Med* 2003;50:599 – 607
6. Wagner WH, Cossman DV, Farber A, et al. Hyperperfusion syndrome after carotid endarterectomy. *Ann Vasc Surg*

2005;19:479 – 86

7. Oommen KJ, Saba S, Oommen JA, et al. The relative localizing value of inter-ictal and immediate postictal SPECT in seizures of temporal lobe origin. *J Nucl Med* 2004;45:2021–25
8. Luh W, Bodurzka J, Bandettini P. Cardiac Phase Related Limitation on Lower Brain Perfusion Measurements Using Quantitative Pulsed Arterial Spin Labeling. *Annual Meeting: Organization for Human Brain Mapping; Florence, Italy, June 11–15, 2006*
9. Wong EC, Cronin M, Wu WC, et al. Velocity-selective arterial spin labeling. *Magn Reson Med* 2006; 55:1334 – 41
10. Parkes LM, Rashid W, Chard DT, et al. Normal cerebral perfusion measurements using arterial spin labeling: reproducibility, stability, and age and gender effects. *Magn Reson Med* 2004; 51:736 – 43
11. Deibler AR, Pollock JM, Kraft RA, et al. Arterial spin labeling in routine clinical practice, Part 1: technique and artifacts. *AJNR Am J Neuroradiol* 2008;29:1228 –34
12. Field AS, Laurienti PJ, Yen YF, et al. Dietary caffeine consumption and withdrawal: confounding variables in quantitative cerebral perfusion studies? *Radiology* 2003; 227:129 –35
13. Laurienti PJ, Field AS, Burdette JH, et al. Dietary caffeine consumption modulates fMRI measures. *Neuroimage* 2002; 17:751–57
14. Laurienti PJ, Field AS, Burdette JH, et al. Relationship between caffeine-induced changes in resting cerebral perfusion and blood oxygenation level-dependent signal. *AJNR Am J Neuroradiol* 2003; 24:1607–11
15. Wijdicks EF. Determining brain death in adults. *Neurology* 1995; 45:1003–11
16. Schwartz RB. Hyperperfusion encephalopathies: hypertensive encephalopathy and related conditions. *Neurologist* 2002; 8:22–34
17. Elster AD, Moody DM. Early cerebral infarction: gadopentetate dimeglumine enhancement. *Radiology* 1990; 177:627–32
18. Wagner WH, Cossman DV, Farber A, et al. Hyperperfusion syndrome after carotid endarterectomy. *Ann Vasc Surg* 2005; 19:479 – 86
19. Lee SK, Lee SY, Yun CH, et al. Ictal SPECT in neocortical epilepsies: clinical usefulness and factors affecting the pattern of hyperperfusion. *Neuroradiology* 2006; 48:678 – 84
20. Brown GG, Clark C, Liu TT. Measurement of cerebral perfusion with arterial spin labeling. Part 2. Applications. *J Int Neuropsychol Soc* 2007; 13:526 –38
21. Kim HS, Kim SY. A prospective study on the added value of pulsed arterial spin-labeling and apparent diffusion coefficients in the grading of gliomas. *AJNR Am J Neuroradiol* 2007; 28:1693–99
22. Hacıbeyli N, Nour R, Pile-Spellman J, et al. Adaptive changes of autoregulation in chronic cerebral hypotension with arteriovenous malformations: an acetazolamide-enhanced single-photon emission CT study. *AJNR Am J Neuroradiol* 1995; 16:1865–74
23. Young WL, Kader A, Ornstein E, et al. Cerebral hyperemia after arteriovenous malformation resection is related to “breakthrough” complications but not to feeding artery pressure: The Columbia University Arteriovenous Malformation Study Project. *Neurosurgery* 1996; 38:1085–93, discussion 1093– 85
24. Casey SO, McKinney A, Teksam M, et al. CT perfusion imaging in the management of posterior reversible encephalopathy. *Neuroradiology* 2004; 46:272–76
25. Gupta V. Silent or non-clinical infarct-like lesions in the posterior circulation territory in migraine: brain hypoperfusion or hyperperfusion? *Brain* 2006; 129:E39
26. Rogers LR. Cerebrovascular complications in cancer patients. *Neurol Clin* 2003; 21:167–92
27. Macfarlane R, Moskowitz MA, Sakas DE, et al. The role of neuroeffect or mechanisms in cerebral hyperperfusion syndromes. *J Neurosurg* 1991; 75:845–55
28. Ito H, Kanno I, Ibaraki M, et al. Changes in human cerebral blood flow and cerebral blood volume during hypercapnia and hypocapnia measured by positron emission tomography. *J Cereb Blood Flow Metab* 2003; 23:665–70
29. Muehlschlegel IS, Voetsch B, Singhal AB. CT angiography and CT perfusion in post-CEA hyperperfusion syndrome. *Neurology* 2007; 68:1437
30. Moskowitz MA, Macfarlane R, Tasdemiroglu E, et al. Neurogenic control of the cerebral circulation during global ischemia. *Stroke* 1990; 21(11 suppl): III 168 –71
31. Noth U, Meadows GE, Kotajima F, et al. Cerebral vascular response to hypercapnia: determination with perfusion MRI at 1.5 and 3.0 Tesla using a pulsed arterial spin labeling technique. *J Magn Reson Imaging* 2006; 24:1229 –35
32. A.R. Deibler, J.M. Pollock, R.A. Kraft, H. Tan, J.H. Burdette and J.A. Maldjian  
*American Journal of Neuroradiology* September 2008, 29 (8) 1428-1435.