



МЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Обзорная статья

УДК 616.8-006

<https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-66-84>

Визуализация опухолей головного мозга: снова о стандартизированном МРТ-протоколе

Н. Е. Захарова¹, И. Н. Пронин², А. И. Баталов³, И. В. Чехонин⁴, А. Н. Тюрина⁵

^{1–5} ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия

¹ nzakharova@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0516-3613>

² pronin@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>

³ abatalov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8924-7346>

⁴ ivan.chekhonin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6652-2472>

⁵ aturina@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2333-7867>

Автор, ответственный за переписку: Наталья Евгеньевна Захарова, nzakharova@nsi.ru

Резюме

Стандартизированный подход к исследованию пациентов с опухолями головного мозга, несмотря на повсеместное применение МР-томографов, до сих пор не утвержден. Это иногда затрудняет интерпретацию полученных данных и ограничивает возможность постановки точного диагноза. При таких обстоятельствах становится сложным планировать операцию, химио- или лучевую терапию, определять изменения патологического процесса в динамике. В связи с этим актуальной остается проблема унификации протоколов применения различных методик МРТ и параметров получения изображений. В статье предлагается стандартный протокол МРТ для пациентов с опухолями головного мозга, который должен включать T2-взвешенные изображения (аксиальная и коронарная проекции), T2-FLAIR (аксиальная проекция или 3D-последовательность), 3D T2* (градиентное эхо), диффузионно-взвешенные изображения, аксиальные T1-взвешенные изображения, постконтрастные T1-взвешенные изображения в режиме спиновое эхо (аксиальные или в трех проекциях) с обязательным их дополнением изотропными 3D T1-последовательностями. Этот минимальный набор режимов МРТ дает возможность правильной постановки диагноза и оценки изменений патологического процесса при последующих исследованиях. МРТ должна быть выполнена на томографе напряженностью магнитного поля минимум 1,5 Тл.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография, опухоли головного мозга

Для цитирования: Захарова Н. Е., Пронин И. Н., Баталов А. И., Чехонин И. В., Тюрина А. Н. Визуализация опухолей головного мозга: снова о стандартизированном МРТ-протоколе // Радиология — практика. 2024;1:66-84. <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-66-84>

© Захарова Н. Е., Пронин И. Н., Баталов А. И., Чехонин И. В., Тюрина А. Н., 2024

MEDICAL TECHNOLOGY

Review article

Neuroimaging of brain tumors: back to the standardized MRI-protocol

N. E. Zakharova¹, I. N. Pronin², A. I. Batalov³, I. V. Chekhonin⁴, A. N. Tyurina⁵

^{1–5} N. N. Burdenko National Medical Research Center OF Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

¹ nzakharova@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0516-3613>

² pronin@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>

³ abatalov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8924-7346>

⁴ ivan.chekhonin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6652-2472>

⁵ aturina@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2333-7867>

Corresponding author: Natal'ya E. Zakharova, nzakharova@nsi.ru

Abstract

Despite the widespread application of MRI in brain tumor MR-imaging, the standardized MRI protocol has not yet been approved. This fact creates obstacles for interpreting of the obtained data and even limits the diagnostic power of MRI. Standardization of MRI studies facilitates successful planning of surgery, chemotherapy, or radiation therapy and provides more reliable follow-up. In this regard, unification of image acquisition parameters and protocols remains relevant. We propose a standard MRI protocol that includes axial and coronal T2-weighted images, axial or 3D T2-FLAIR, 3D T2* (gradient echo), diffusion-weighted imaging, axial T1-weighted images, contrast-enhanced spin-echo T1-weighted images (either axial or three planes) and obligatory subsequent isotropic 3D T1 images. The following combination of sequences facilitates the correct diagnosis and follow-up. The least magnetic field strength should be 1.5 T.

Keywords: Magnetic Resonance Imaging, Brain Tumors

For citation: Zakharova N. E., Pronin I. N., Batalov A. I., Chekhonin I. V., Tyurina A. N. Neuroimaging of brain tumors: back to the standardized MRI-protocol. *Radiology – Practice*. 2024;1:66-84. (In Russ.). <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-66-84>

Введение

До настоящего времени стандартизация подхода к проведению магнитно-резонансной томографии (МРТ) у пациентов с опухолями головного мозга не утверждена, что зачастую ограничивает возможности метода в диагностике, предоперационном планировании, планировании химио- или лучевой те-

рапии, а также динамическом контроле [14, 16]. В связи с этим актуальной остается проблема унификации протоколов применения различных методик МРТ и параметров получения изображений [2, 4, 6].

Предлагаемый в статье стандартизированный протокол МРТ-исследования пациентов с нейроонкологическими

заболеваниями согласуется с российскими и международными рекомендациями по обследованию пациентов с разной патологией ЦНС [2, 4, 6].

Цель: обзор современных подходов к стандартному МРТ-исследованию пациентов с первичными и вторичными опухолями головного мозга и другими интракраниальными объемными образованиями.

Стандартный протокол МРТ-исследования

МРТ — метод выбора при интракраниальных опухолях. Возможности компьютерной томографии (КТ) ограничены. Однако КТ может дать необходимую информацию в экстренных случаях, например, при острых кровоизлияниях, вклинениях мозга и при развитии острой гидроцефалии. КТ может применяться как дополнительный метод при исследовании структуры опухолей с возможностью изучения объемного мозгового кровотока в них, для поиска включений, имеющих специфические плотностные характеристики (например, петрификатов, жировой ткани), а также для выявления деструкции костей свода и основания черепа.

Стандартный протокол МРТ должен всегда включать T2-взвешенные изображения минимум в двух проекциях (аксиальной и коронарной), T2-FLAIR изображения в аксиальной проекции или 3D-последовательность, 3D T2* режим градиентного эха высокого разрешения — например, SWI (susceptibility weighted imaging) или SWAN (susceptibility weighted angiography), диффузионно-взвешенные изображения (эхо-планарная — EPI — последовательность). Линия наклона аксиальных изображений должна проходить по нижним контурам колена и валика мозолистого тела. При исследовании должны выполняться доконтрастные аксиальные T1-взвешенные изображения в режиме спиновое эхо

(spin echo) до 5 мм толщиной (интервал между срезами — 1 мм), а также аналогичные постконтрастные аксиальные T1-взвешенные изображения с дополнением их обязательными 3D T1-последовательностями с изотропным вокселем (например, spoiled gradient echo, SPGR) или 3D T1 (fast spin echo, FSE).

До- и постконтрастные T1 SE изображения должны быть выполнены с одинаковыми параметрами и в одинаковой проекции (лучше аксиальной, однако мы всегда выполняем постконтрастные T1 SE серии в трех проекциях). При отсутствии возможности выполнения 3D T1-режима после введения контрастного препарата необходимо обязательно выполнять T1 FSE/TSE в трех проекциях — аксиальной, коронарной и сагиттальной.

Этот минимальный набор режимов МРТ дает возможность правильной постановки диагноза, выбора тактики лечения и динамического контроля. Стандартом исследования в нейроонкологии считается МРТ-исследование, выполненное на аппарате с напряженностью магнитного поля 1,5 Тл и 3 Тл [6].

В табл. 1 представлен стандартный протокол по исследованию пациентов с опухолями мозга, применимый для 1,5 Тл и 3 Тл МР-томографов.

Обзор основных режимов стандартного МРТ-протокола

Главная цель стандартных МРТ состоит в диагностике, определении размера опухоли и ее локализации, структуры, объемного воздействия с компрессией желудочковой и сосудистой систем, определения распространенности перифокального отека (или отека-инфильтрации) [2, 4, 21].

ВОЗ внесла изменения в классификацию опухолей ЦНС в 2021 году, дополнив диагноз молекулярно-генетическими признаками, сделав процесс постановки диагноза более сложным

Таблица 1

Стандартный МРТ-протокол для диагностики опухолей головного мозга

Последовательности	Параметры	Длительность
Аксиальные и коронарные T2 SE	TR 3000 – 5000 мс TE $\geq$ 80 мс Толщина среза $\leq$ 5 мм	4–7 мин
Аксиальные T1 SE	TR 400–650 мс TE 10–20 мс Толщина среза $\leq$ 5 мм	2,5–3 мин
Аксиальные 2D T2-FLAIR FSE/ TSE (или 3D)	TR 8000–12000 мс TE 95–130 мс TI 2200 – 2850 мс Толщина среза $\leq$ 5 мм	3–3,5 мин
Аксиальные ДВИ (EPI)	b-value – 0, 1000 Толщина среза – 5 мм	1 мин
3D T2* (SWI, SWAN)	Параметры в зависимости от рекомендаций производителя Толщина среза – 1,8–2,8 мм	~5,5 мин
Аксиальные (+сагиттальные, коронарные) T1 SE постконтрастные	Толщина среза $\leq$ 5 мм	8–10 мин (в трех проекциях)
3D T1 (CUBE, SPGR, FSPGR- BRAVO, MPRAGE, IR-GRE, 3D Fast FE и т. д.)	Параметры в зависимости от рекомендаций производителя Толщина среза – 1 мм, изотропный воксель	3,5–5 мин

[10, 16, 17]. Однако применение даже стандартного МРТ-протокола дает возможность предположить достаточно точный диагноз на основании только этих последовательностей, значимо укорачивая дифференциальный ряд.

Структурные МРТ-режимы T2 и T2-FLAIR выявляют объемные образования, а также любые другие повреждения мозга и изменения белого/серого вещества. Например, диффузно растущие глиомы grade 2, не накапливающие контрастный препарат, хорошо визуализируются с помощью этих последовательностей (рис. 1).

На T2- и T2-FLAIR-изображениях можно выявить также зону перифокального отека в виде области гиперинтенсивного сигнала по периферии основной ткани опухоли. Перифокальный отек при метастазах или неинфильтративно

растущих вне мозговых опухолях является вазогенным и образуется в результате повышения объема внеклеточной воды при диффузии плазмы из хрупких капилляров опухоли во внесосудистое пространство. При глиомах высокой степени злокачественности перифокальная в T2 и T2-FLAIR зона повышенного МР-сигнала — это вазогенный отек с инфильтрацией его клетками опухоли (рис. 2). Истинные границы глиальной опухоли, а особенно опухоли высокой степени злокачественности, определить по данным T2/T2-FLAIR, а также других стандартных последовательностей невозможно [2, 4].

Рутинный T2-режим дает возможность определить вне мозговую локализацию некоторых интракраниальных опухолей (менингиом, неврино, вне мозговых метастазов и других образо-

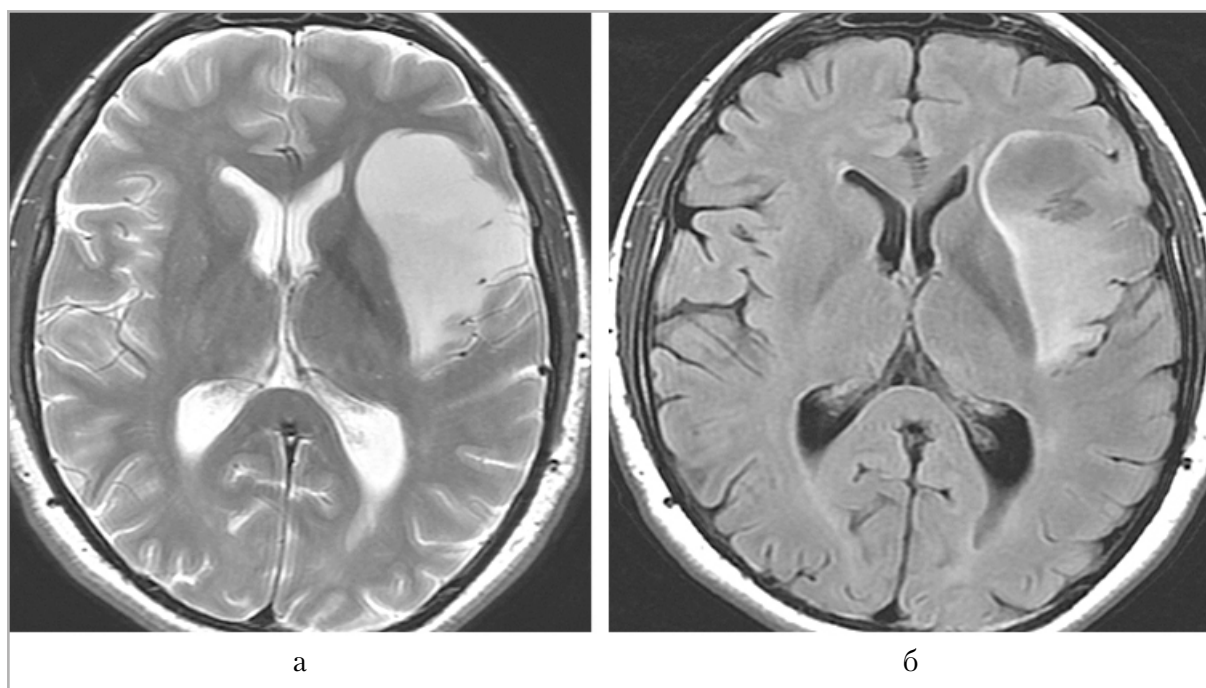


Рис. 1. МРТ пациента с диффузной астроцитомой, grade 2, в левой лобно-височно-островковой области, T2 (а), T2-FLAIR (б)

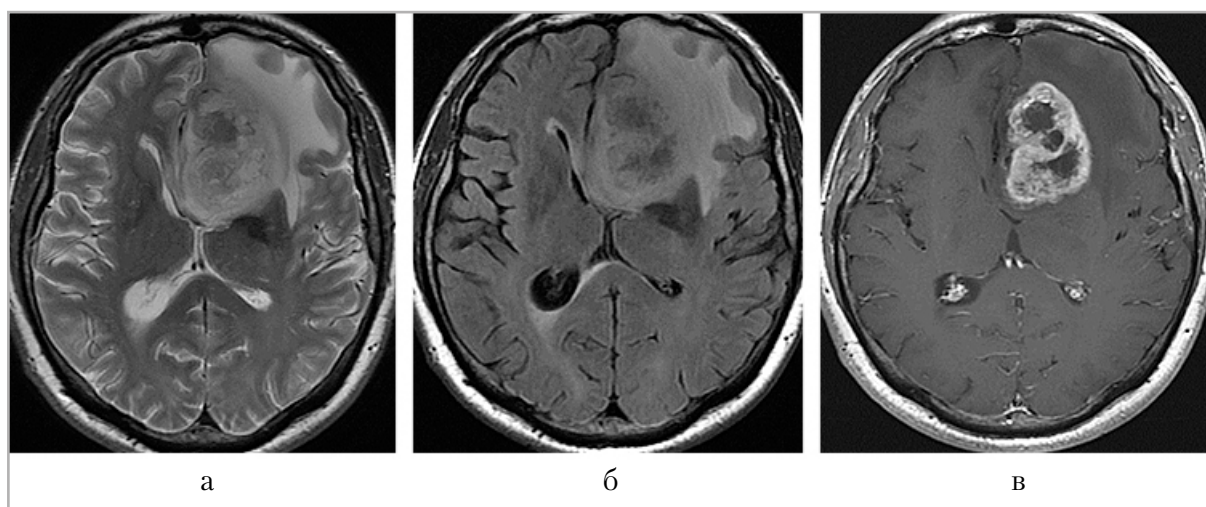


Рис. 2. Внутримозговая опухоль в левой лобной области и колоне мозолистого тела (глиобластома, grade 4). На МРТ в режимах T2 — а, T2-FLAIR — б, T1 после введения контрастного препарата (в) визуализируется диффузно растущая опухоль гетерогенной структуры с участками некроза, неоднородно накапливающая контрастный препарат, имеющая перифокальную зону отека-инфильтрации

ваний) при выявлении ликворной щели (тонкой полоски повышенного МР-сигнала), сосудов или твердой мозговой оболочки между опухолью и мозговой тканью [4].

Последовательность SWI (SWAN) чувствительна к продуктам распада кро-

ви (парамагнетикам) и кальцинатам (диамагнетикам) [3], поэтому используется для выявления кровоизлияний, а также для визуализации новообразованных сосудов опухоли с деоксигенированной кровью, что позволяет уточнить степень злокачественности глиомы. SWI также

помогает дифференцировать опухоли с кальцинатами, например, олигодендроглиомы, астроцитомы, эпендимомы.

Стандартный рутинный МРТ-протокол обязательно содержит диффузионно-взвешенные изображения (ДВИ) с определением количественного параметра — измеряемого коэффициента диффузии (ИКД). ДВИ — важная по-

следовательность для дифференцирования опухолей. Например, повышенный МР-сигнал на ДВИ и низкий ИКД показывают опухоль с высокой плотностью клеток и ограниченной диффузией во внеклеточном пространстве — частое явление в случае лимфом (рис. 3).

Высокий МР-сигнал на ДВИ и низкий ИКД также наблюдаются при

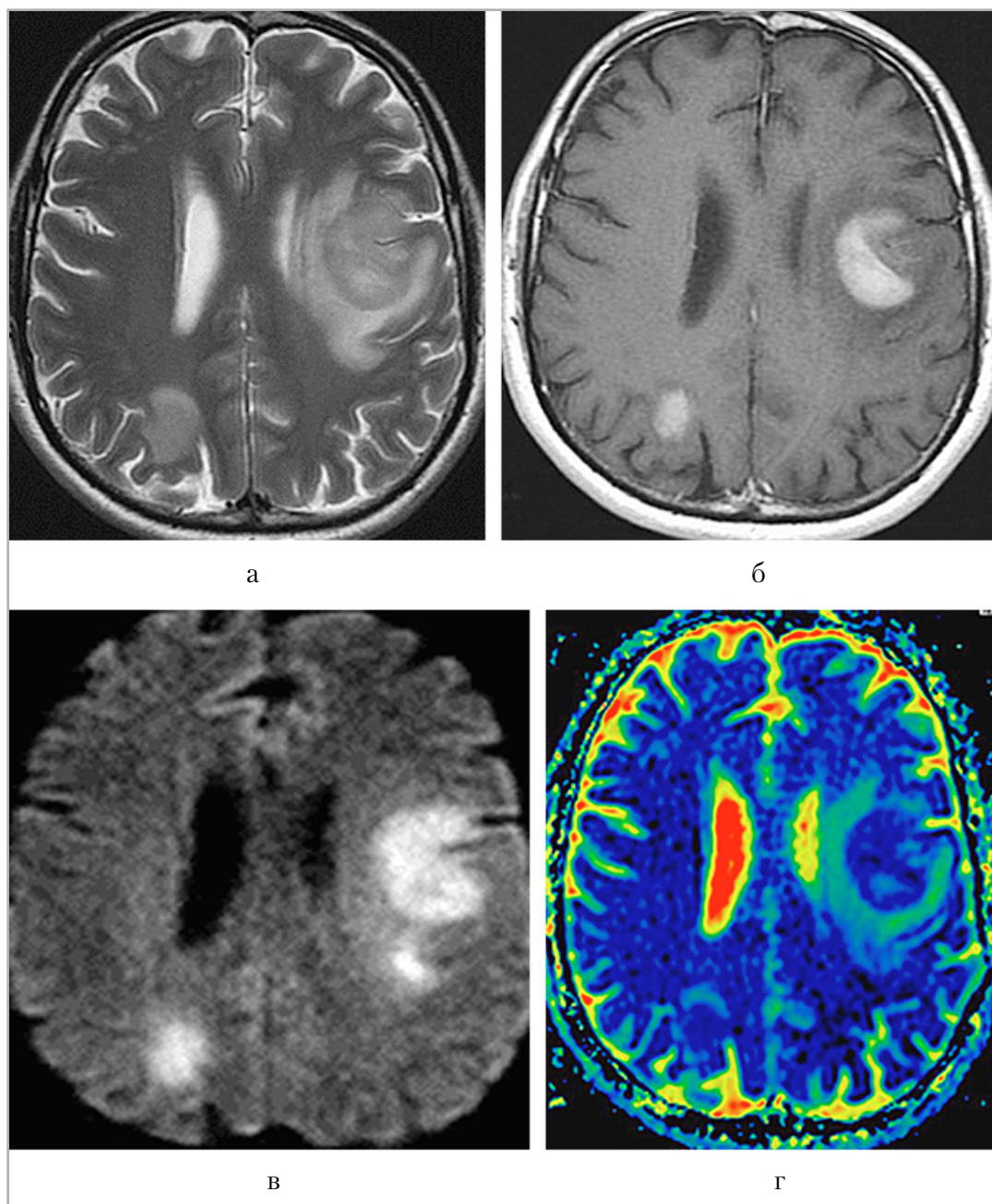


Рис. 3. Первичная лимфома ЦНС. На МРТ в режимах T2 (а), T1 после введения контрастного препарата (б), на диффузионно-взвешенном изображении (в), а также на карте ИКД (г) определяются объемные образования в белом веществе больших полушарий, имеющие высокий МР-сигнал в режиме диффузии, сниженный ИКД, интенсивно накапливающие контрастный препарат

некоторых подтипах менингиом, при медуллобластомах и некоторых других патологических процессах [4, 11]. С помощью режима диффузии уверенно дифференцируются эпидермоидные кисты — объемные образования, не являющиеся опухолями, но иногда имитирующие их. Кистозные, некротические компоненты опухолей (например, при глиобластомах) имеют повышенный ИКД, что дает возможность дифференцировать опухоли с некрозом в центре и кольцевидным накоплением контрастного препарата от абсцессов, имеющих, наоборот, высокий МР-сигнал на ДВИ и низкие показатели ИКД (рис. 4).

Диффузионно-взвешенные изображения и ИКД применяются для

предположения степени злокачественности глиом, т. к. известно, что глиомы grade 3–4 имеют более низкие значения ИКД по сравнению с глиомами grade 1–2 [7, 12, 16]. В ряде исследований были показаны корреляции генетических особенностей опухоли и показателей ИКД — IDH-мутантные глиомы, имеющие более благоприятный прогноз, имеют более высокие значения ИКД по сравнению с IDH-дикого типа [9, 16, 19]. Однако в других исследованиях было выявлено перекрытие значений ИКД в глиомах высокой и низкой степеней злокачественности, что снижает роль этих количественных показателей в дифференциальной диагностике [21].

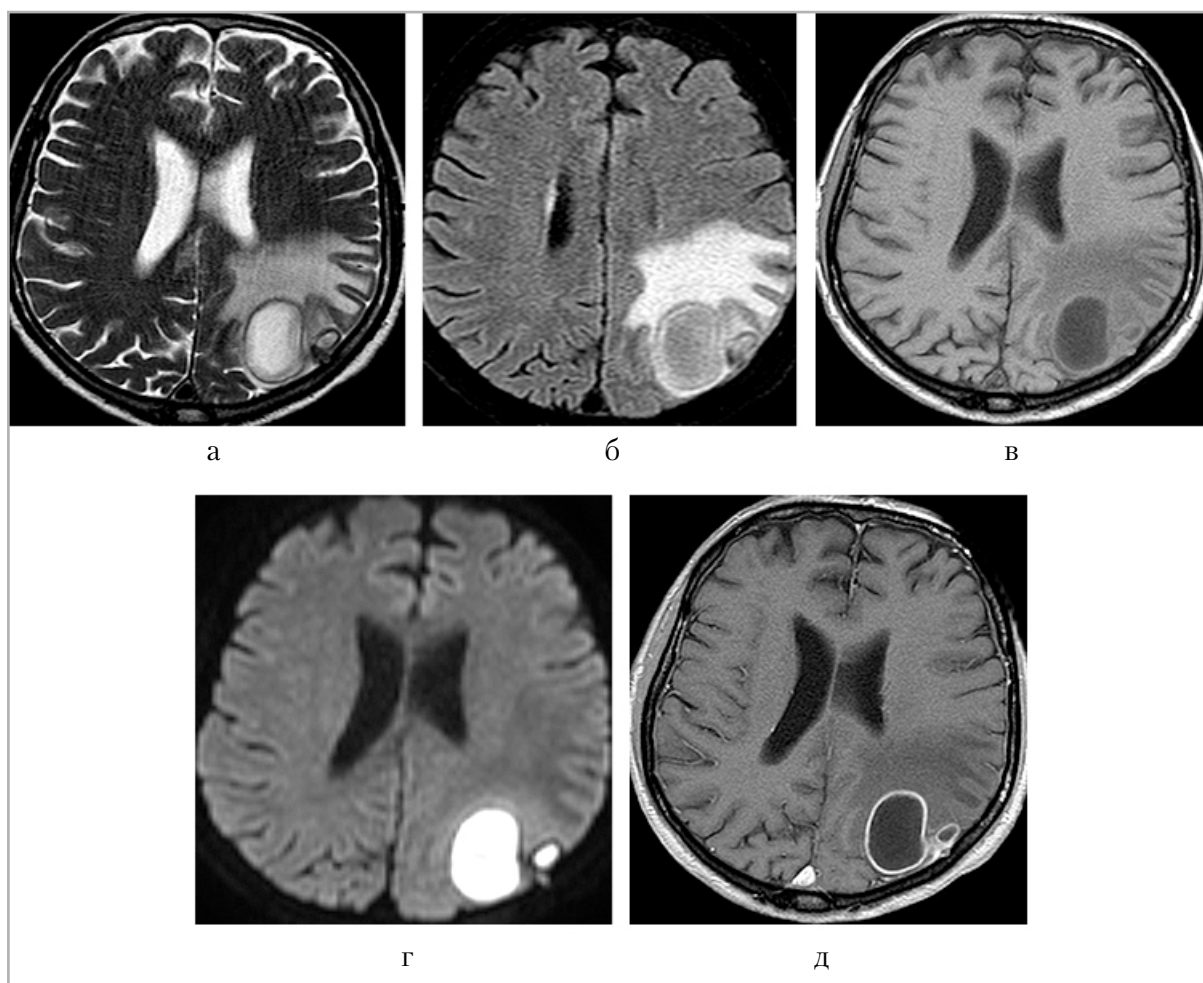


Рис. 4. Абсцесс в левой теменной области. На МРТ в режимах T2 — а, T2-FLAIR — б, T1 до и после введения контрастного препарата (в, д) определяется объемное образование с жидкостным содержимым и капсулой, кольцевидно, равномерно и тонко накапливающей контраст (д), содержимое абсцесса имеет высокий МР-сигнал в режиме диффузии (г)

Высокий МР-сигнал на T1-взвешенных изображениях может говорить о наличии в исследуемых структурах подострой крови, меланина или жира. При подозрении на жировую ткань в объемном образовании или при исследованиях опухолей в области основания черепа и орбит, богатых жировой тканью, целесообразно выполнять T1-взвешенные изображения с технологией подавления жира (рис. 5).

Применение контрастирования при МРТ-исследованиях

Применение внутривенного контрастирования при опухолях мозга является частью стандартного МРТ-протокола. Контрастирование патологических тканей выявляется в участках нарушенного гематоэнцефалического или гемато-опухолевого барьера, что наблюдается при разных патологических со-

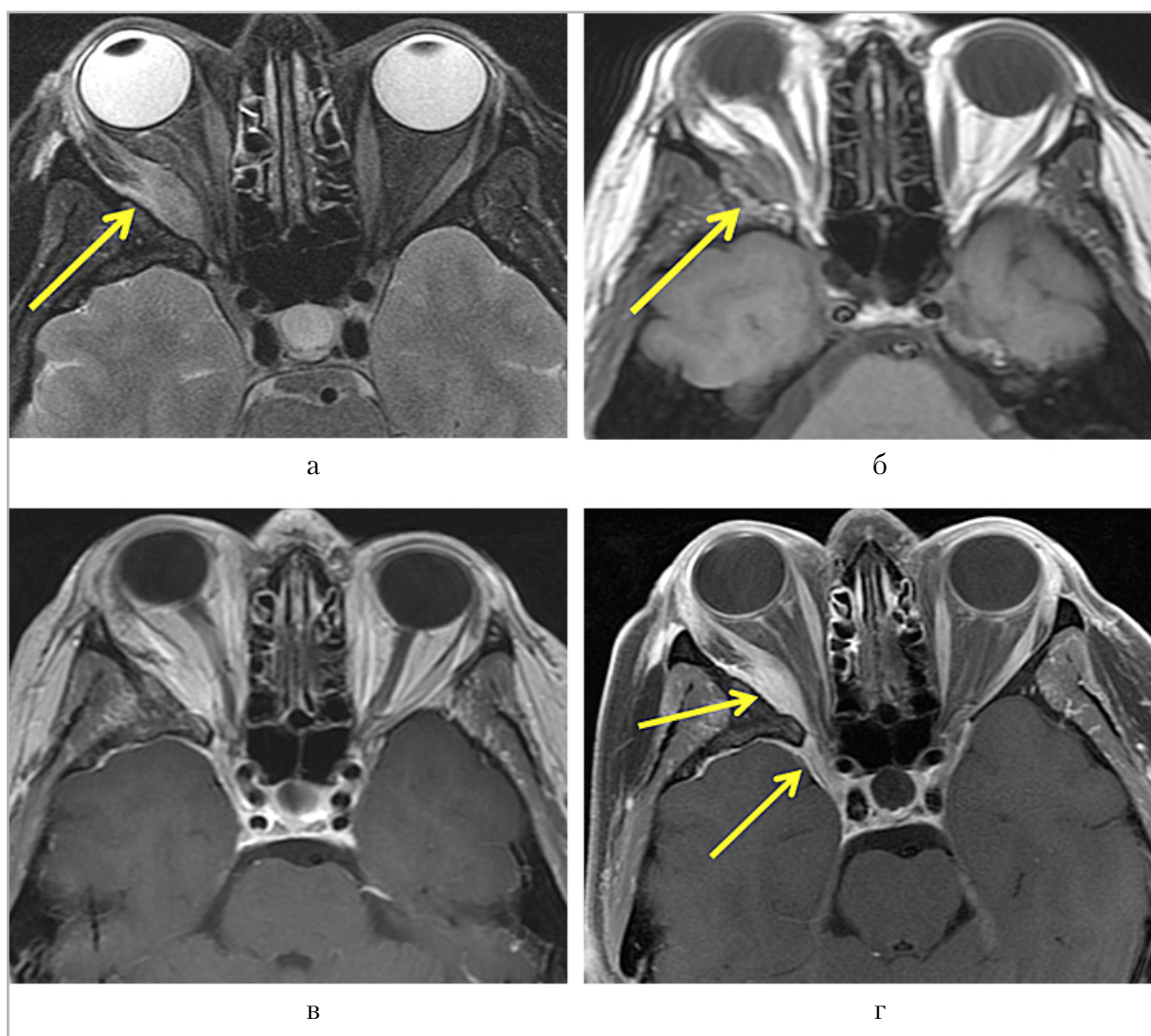


Рис. 5. Менингиома в области кавернозного синуса, средней черепной ямки справа и правой орбиты. На МРТ в T2-режиме с подавлением жира (а) и в режиме T1 (б) визуализируется объемное образование в латеральных отделах правой орбиты (стрелки), вызывающее экзофтальм. После введения контрастного препарата (режим T1, в) определяется его накопление по медиальным отделам средней черепной ямки справа, однако МР-сигнал от накопившей контраст опухоли в орбите имеет аналогичный МР-сигнал с ретробульбарной жировой клетчаткой, контуры опухоли четко не определяются. В режиме T1 с подавлением жира (г) контуры менингиомы хорошо визуализируются как интракраниально, так и в орбите (стрелки)

стояниях ЦНС опухолевой или другой природы. Для злокачественных опухолей характерен неангиогенез, т. е. образование сети патологически измененных, хрупких сосудов, через которые контрастный препарат распространяется во внесосудистое пространство, при этом интенсивность сигнала в T1-режиме в этих зонах повышается (происходит накопление контраста). Вместе с тем для некоторых злокачественных опухолей, например первичных лимфом ЦНС, неангиогенез нехарактерен, однако опухолевые клетки, располагаясь ангиоцентрически, повреждают ранее существовавшие сосуды головного мозга, повышая их проницаемость, и это проявляется в виде интенсивного контрастирования.

Накопление контрастного препарата часто сочетается с высокой степенью злокачественности диффузных глиом, но глиомы grade 3 и даже grade 4 иногда вообще не накапливают контрастный препарат, а некоторые доброкачественные глиомы grade 1 могут интенсивно контрастироваться (например, пилоидная астроцитома). Однако контрастирование остается важным элементом дифференцирования опухолей и определения степени злокачественности глиальных образований [4]. Важно также использовать стандартные дозы контрастных препаратов согласно инструкциям производителей.

В настоящее время широко применяются 3D-последовательности в режимах T2, T2-FLAIR, T1, которые, имея тонкие срезы и изотропный воксель, позволяют визуализировать небольшие структурные изменения мозга, небольшие объемные образования, реконструировать изображения в любых плоскостях и без потери качества первичных данных [6].

При выполнении T1 SE последовательности с толщиной среза 3–5 мм возможно пропустить небольшие, иногда точечные метастазы, а также затруд-

нительно сравнить размеры остатков опухоли и другие структуры до и после химио- и лучевой терапии. 3D T1-изображения с изотропным вокселем (толщиной среза до 1 мм) до и после введения контрастного препарата повышают возможность раннего выявления и точность контроля изменений в динамике при опухолях малых объемов, что важно в случаях метастатического поражения, а особенно перед радиохирургическим лечением [2, 4, 13]. Однако если нет возможности применения 3D T1 FSE (CUBE, SPACE, VISTA), а имеется только 3D T1 GRE-последовательность (FSPGR BRAVO, MPRAGE и др.), то в протокол исследования необходимо добавлять аксиальные T1 SE-изображения (толщиной среза 3–5 мм), а лучше в трех проекциях, что сделает исследование более полноценным (рис. 6).

Несмотря на то что 3D T1 GRE является надежной, хорошо отражающей анатомическую картину последовательностью, широко применяемой повсеместно, она имеет недостатки. Накопление контрастного препарата в этом режиме менее очевидно по сравнению со spin echo (SE) режимами [13], например, метастазы, интенсивно накопившие контрастный препарат на фоне яркого белого вещества мозга, менее заметны (рис. 6). Также в режимах 3D T1 GRE контрастируются нормальные сосуды, которые могут выглядеть как множественные яркие точки и препятствовать выявлению небольших метастазов в корково-субкортикальных отделах больших полушарий. Еще одним недостатком 3D T1 GRE (по сравнению с 3D T1 FSE) является отсутствие возможности адекватного подавления жира, что не позволяет четко определить объемные образования в костях свода и основания черепа, а также в орбитальной зоне [13].

При использовании 3D-последовательностей следует также помнить о правильном выборе параметров получения изображения — толщина среза

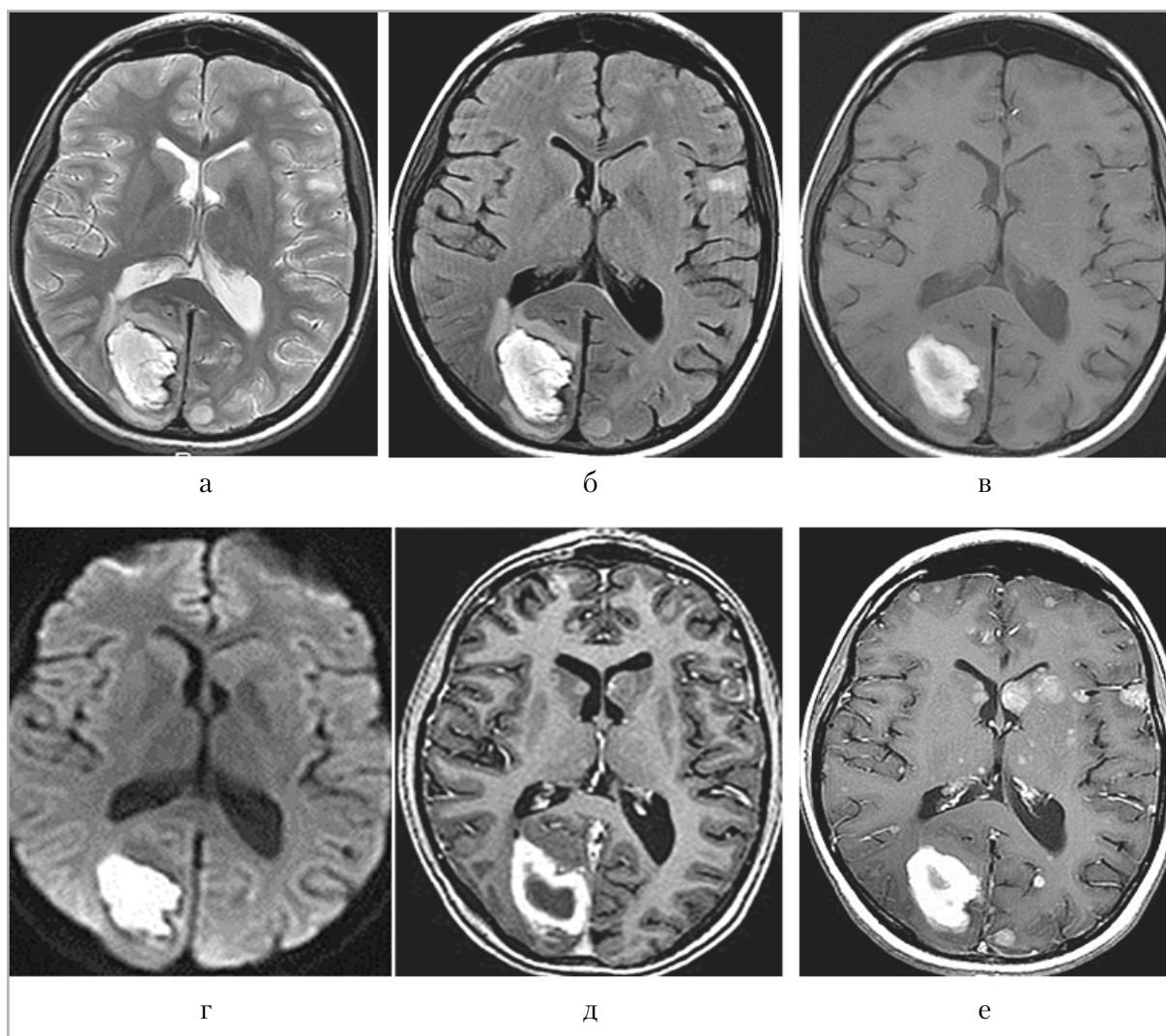


Рис. 6. Метастазы беспигментной меланомы в головном мозге. На МРТ в режимах T2 (а), T2-FLAIR (б), T1 (в), диффузии (г) выявляется внутримозговое кровоизлияние в правой затылочной доле, а также множественные участки повышения МР-сигнала в режимах T2 и T2-FLAIR в полушарных структурах. На постконтрастных T1 FSE толщиной 5 мм (е) метастазы визуализируются лучше, чем на 3D T1 SPGR толщиной 1 мм (д)

должна быть до 1 мм, поле обзора 250–256 мм, а матрица в частотном и фазовом направлениях должна совпадать (256×256). Только при таких условиях будет возможно построение реформатов без потери качества изображения.

Использование режимов перфузии при МРТ-исследованиях пациентов с опухолями головного мозга

Применение МРТ до и после введения контрастного препарата – это золо-

той стандарт диагностики при опухолевом поражении головного мозга, однако одно только контрастирование часто не позволяет дифференцировать степень злокачественности опухоли (например, глиомы), а также разделить возможную прогрессию опухоли и постлучевую реакцию тканей мозга. В таких случаях на помощь приходят более сложные дополнительные методики – МР-перфузионные режимы – бесконтрастная ASL (arterial spin labeling, маркирование артериальных спинов), DSC T2 или T2* (динамическая МРТ по кон-

трастной восприимчивости, dynamic susceptibility contrast), DCE (перфузия с динамическим контрастированием, dynamic contrast-enhanced). Эти методики дают возможность исследовать объемный мозговой кровоток, характеризуют микроваскулярный объем в опухоли, определяют патологическую проницаемость сосудов пораженных тканей [8, 15, 16, 18, 20]. T2- или T2* DSC-перфузия требует введения контрастного препарата и измеряет относительный микроваскулярный объем, что может помочь при определении степени злокачественности опухоли. DCE-перфузия (также с введением контрастного препарата) дает инфор-

мацию о проницаемости гематоэнцефалического барьера, необходимую для дифференциального диагноза. Бесконтрастная ASL-перфузия использует эндогенные маркеры артериальной крови и имеет преимущества в виде получения абсолютных параметров скорости кровотока и возможности многократного повторения этой последовательности [1]. ASL-перфузия показала высокую чувствительность и специфичность в дифференциальной диагностике глиом низкой и высокой степени злокачественности [1, 5] (рис. 7–9), а также в послеоперационном периоде при динамическом наблюдении пациентов после лучевой терапии и химиотерапии.

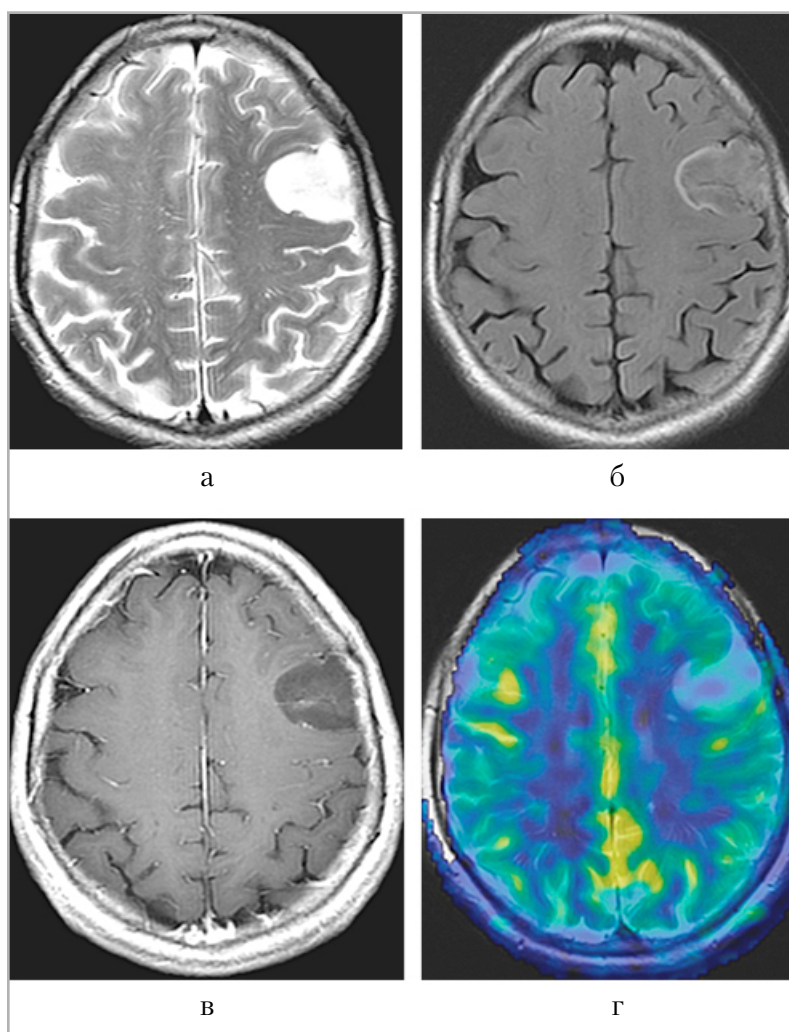


Рис. 7. Диффузная астроцитома, grade 2, в левой лобной доле. На МРТ в режимах T2 (а), T2-FLAIR (б), T1 после введения контрастного препарата (в), ASL-перфузии, совмещенной с T2 (г), выявляется опухоль, не накапливающая контрастный препарат, с низким кровотоком

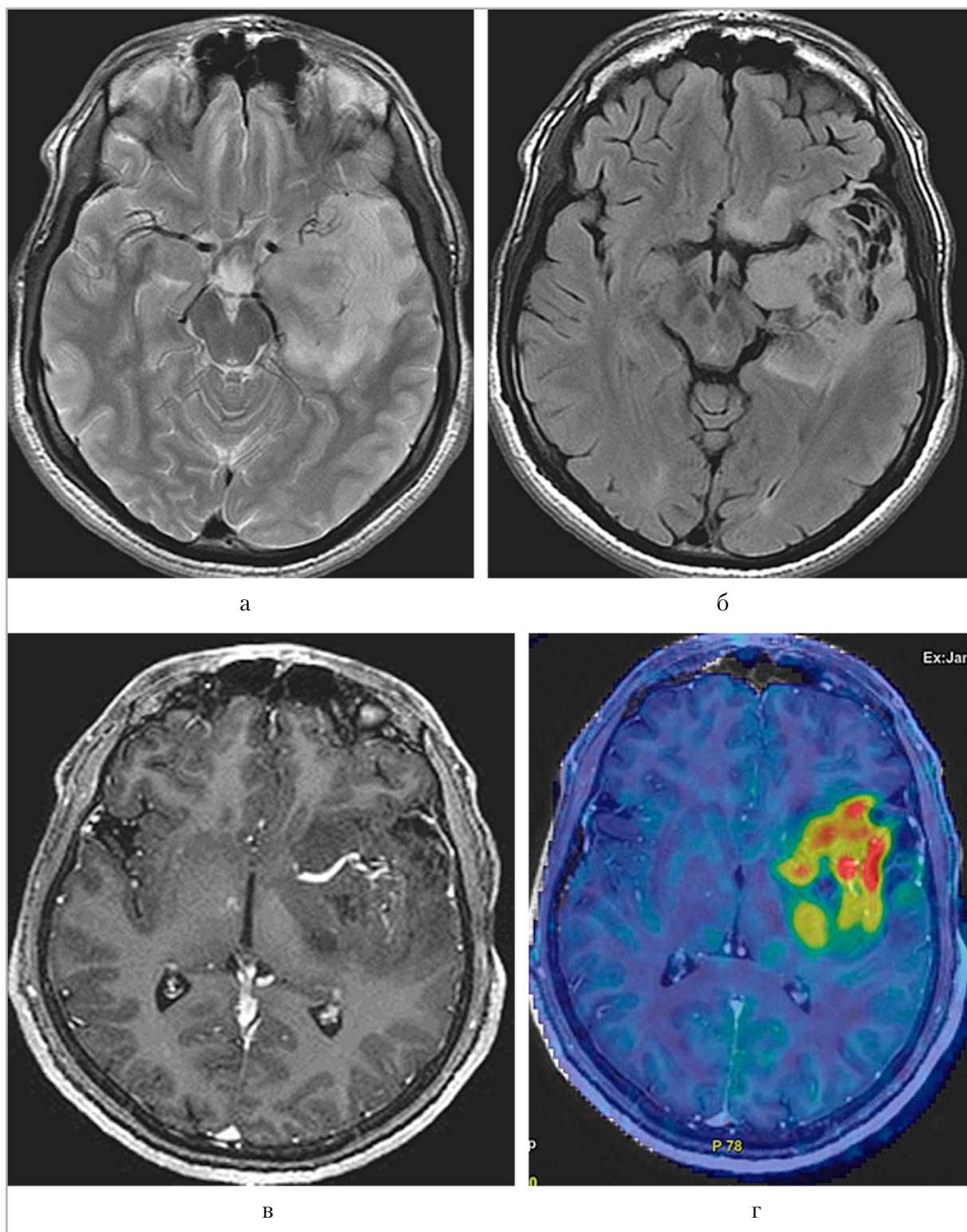


Рис. 8. Астроцитома, grade 3, в левой лобно-височной области. МРТ в режимах T2 (а), T2-FLAIR (б), T1 после введения контрастного препарата (в), ASL-перфузии, совмещенной с постконтрастными T1 (г), показывает диффузно растущую опухоль, слабо гетерогенно накапливающую контрастный препарат, с участками повышенного кровотока до 340,0 мл/100 г/мин

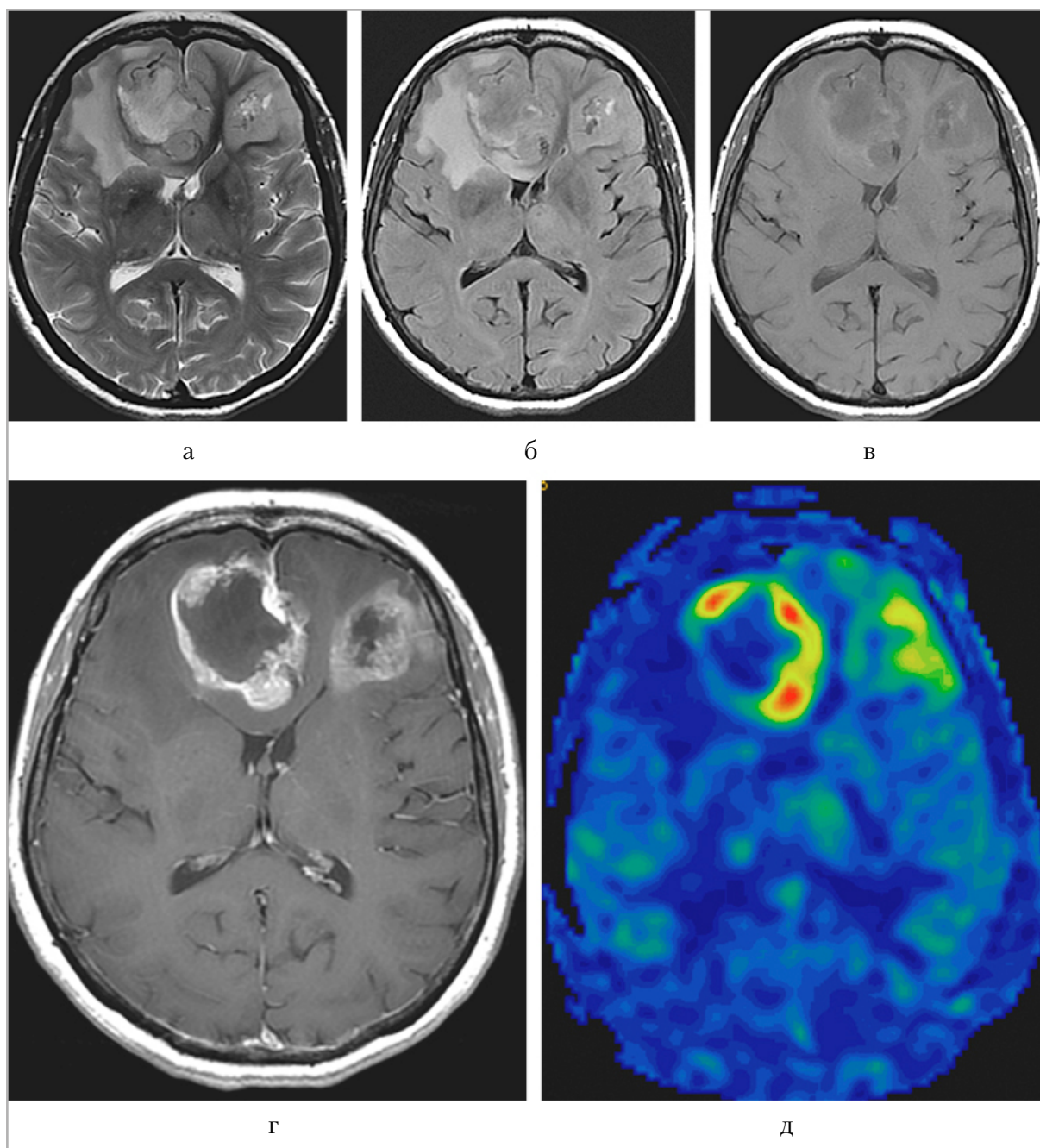


Рис. 9. Мультифокальная глиобластома, grade 4, в лобных долях. МРТ в режимах T2 (а), T2-FLAIR (б), T1 (в), T1 после введения контрастного препарата (г), ASL-перфузии (д) демонстрирует опухолевые образования гетерогенной структуры с некрозом в центре, интенсивно кольцевидно накапливающие контрастный препарат, с повышенным кровотоком до 247 мл/100г/мин

Заключение

Применение стандартного протокола МРТ у пациентов с опухолями головного мозга необходимо для точной диагностики, планирования нейрохирургических вмешательств, а также лучевой терапии и химиотерапии. Вы-

полнение исследований, не включающих импульсные последовательности с указанными характеристиками, может приводить к увеличению вероятности диагностических ошибок (например, неверной интерпретации объемного образования или пропуска мелких обра-

зований), вызывать необходимость повторения МРТ с целью дообследования (что неизбежно откладывает необходимое лечение), а также усложнять сравнение исследований в динамике и вызывать неверную трактовку динамических изменений. Повсеместное внедрение предложенного нами клинически апробированного унифицированного подхода уменьшит время от обнаружения опухоли или выявления изменений при динамическом контроле до принятия решения о тактике ведения пациента.

Список источников

1. Баталов А. И., Захарова Н. Е., Погосбекян Э. Л., Фадеева Л. М., Горяйнов С. А., Баев А. А., Шульц Е. И., Чёлушкин Д. М., Потапов А. А., Пронин И. Н. Бесконтрастная ASL-перфузия в предоперационной диагностике супратенториальных глиом // Вопросы нейрохирургии имени Н. Н. Бурденко. 2018. Т. 82, № 6. С. 15–22. <https://doi.org/10.17116/neiro20188206115>
2. Захарова Н.Е., Пронин И.Н., Баталов А.И., Шульц Е.И., Тюрина А.Н., Баев А.А., Фадеева Л.М. Современные стандарты МРТ-диагностики опухолевых поражений головного мозга // Журнал «Вопросы нейрохирургии» имени Н. Н. Бурденко. 2020. Т. 84, № 3. С. 102–112. <https://doi.org/10.17116/neiro202084031102>
3. Пронин И. Н., Захарова Н. Е., Фадеева Л. М., Пронин А. И., Шульц Е. И., Баталов А. И. Импульсная последовательность SWI/SWAN в МРТ-диагностике микрокровоизлияний и сосудистых мальформаций // Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2018. Т. 1, № 3. С. 49–59.
4. Пронин И. Н., Захарова Н. Е., Баталов А. И., Шульц Е. И., Тюрина А. Н., Баев А. А., Фадеева Л. М. К вопросу о стандартах диагностики поражений головного мозга // Кремлевская медицина. Клинический вестник. 2020. № 1. С. 107–118.
5. Batalov A. I., Zakharova N. E., Pronin I. N., Belyaev A. Yu., Pogosbekyan E. L., Goryaynov S. A., Bykanov A. E., Tyurina A. N., Shevchenko A. M., Solozhentseva K. D., Nikitin P. V., Potapov A. A. 3D pCASL-perfusion in preoperative assessment of brain gliomas in large cohort of patients. Sci. Rep. 2022. V. 12. P. 2121. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05992-4>
6. Ellingson B., Bendszus M., Boxerman J., Barboriak D., Erickson B., Smits M., Nelson S., Gerstner E., Alexander B., Goldmacher G. et al. Consensus recommendations for a standardized Brain Tumor Imaging Protocol in clinical trials. Neuro. Oncol. 2015. V. 17, no. 9. P. 1188–1198. <https://doi.org/10.1093/neuonc/nov095>
7. Gühr G., Horvath-Rizea D., Kohlhof-Meinecke P., Ganslandt O., Henkes H., Härtig W., Donitza A., Skalej M., Schob S. Diffusion Weighted Imaging in Gliomas: A Histogram-Based Approach for Tumor Characterization. Cancers. 2022. V. 14, no. 14. P. 3393.
8. Guida L., Stumpo V., Bellomo J., van Niftrik C. H. B., Sebök M., Berhouma M., Bink A., Weller M., Kulcsar Z., Regli L. et al. Hemodynamic Imaging in Cerebral Diffuse Glioma-Part A: Concept, Differential Diagnosis and Tumor Grading. Cancers. 2022. V. 14, no. 14. P. 1432.
9. Hong E. K., Choi S. H., Shin D. J., Jo S. W., Yoo R. E., Kang K. M., Yun T. J., Kim J. H., Sohn C. H., Park S. H. et al. Radiogenomics correlation between MR imaging features and major genetic profiles in glioblastoma. Eur. Radiol. 2018. V. 28, no. 10. P.4350–4361. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5400-8>
10. Iv M., Bisdas S. Neuroimaging in the Era of the Evolving WHO Classification of Brain Tumors, From the AJR Special Series on Cancer Staging. AJR Am. J. Roentgenol. 2021. V. 217, no. 1. P. 3–15. <https://doi.org/10.2214/AJR.20.25246>
11. Jain R., Essig M. Brain tumor imaging. New York, Stuttgart, Delhi, Rio de Ja-

- neiro Thieme. 2016. <https://doi.org/10.1055/b-0035-122291>
12. Kang X. W., Xi Y. B., Liu T. T., Wang N., Zhu Y. Q., Wang X. R., Guo F. Grading of Glioma: Combined diagnostic value of amide proton transfer weighted, arterial spin labeling and diffusion weighted magnetic resonance imaging. *BMC Med. Imaging*. 2020. V. 20. P. 50.
 13. Kaufmann T. J., Smits M., Boxerman J., Huang R., Barboriak D. P., Weller M., Chung C., Tsien C., Brown P. D., Shankar L., Galanis E., Gerstner E., van den Bent M. J., Burns T. C., Parney I. F., Dunn G., Brastianos P. K., Lin N. U., Wen P. Y., Ellingson B. M. Consensus recommendations for a standardized brain tumor imaging protocol for clinical trials in brain metastases. *Neuro. Oncol.* 2020. V. 22, no. 6. P. 757–772. <https://doi.org/10.1093/neuonc/noaa030>
 14. Mabray M., Barajas R. F., Cha S. Modern brain tumor imaging. *Brain Tumor Res Treat.* 2015. V. 3, no. 1. P. 8–23. <https://doi.org/10.14791/btrt.2015.3.1.8>
 15. Malik D. G., Rath T. J., Urcuyo Acevedo J. C., Canoll P. D., Swanson K. R., Boxerman J. L., Quarles C. C., Schmainda K. M., Burns T. C. and Hu L. S. Advanced MRI Protocols to Discriminate Glioma From Treatment Effects: State of the Art and Future Directions. *Front. Radiol.* 2022. No. 2. P. 809373. <https://doi.org/10.3389/fradi.2022.809373>
 16. Martucci M., Russo R., Schimperia F., D'Apolito G., Panfili M., Grimaldi A., Perna A., Ferranti A. M., Varcasia G., Giordano C. et al. Magnetic Resonance Imaging of Primary Adult Brain Tumors: State of the Art and Future Perspectives. *Biomedicines*. 2023. V. 11, no. 2. P. 364. <https://doi.org/10.3390/biomedicines11020364>
 17. Osborn A. G., Louis D. N., Poussaint T. Y., Linscott L. L., Salzman K. L. The 2021 World Health Organization Classification of Tumors of the Central Nervous System: What Neuroradiologists Need to Know. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2022. V. 43, no. 7. P. 928–937. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A7462>
 18. Stumpo V., Guida L., Bellomo J., Van Niftrik C. H. B., Sebö, M., Berhouma M., Bink A., Weller M., Kulcsar Z., Regli L. et al. Hemodynamic Imaging in Cerebral Diffuse Glioma-Part B: Molecular Correlates, Treatment Effect Monitoring, Prognosis, and Future Directions. *Cancers*. 2022. V. 14, no. 5. P. 1342. <https://doi.org/10.3390/cancers14051342>
 19. Thust S. C., Hassanein S., Bisdas S., Rees J. H., Hyare H., Maynard J. A., Brandner S., Tur C., Jäger H. R., Yousry T.A. et al. Apparent diffusion coefficient for molecular subtyping of non-gadolinium-enhancing WHO grade II/III glioma: Volumetric segmentation versus two-dimensional region of interest analysis. *Eur. Radiol.* 2018. V. 28. P. 3779–3788. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5351-0>
 20. Van Santwijk L., Kouwenberg V., Meijer F., Smits M., Henssen D. A systematic review and meta-analysis on the differentiation of glioma grade and mutational status by use of perfusion-based magnetic resonance imaging. *Insights Imaging*. 2022. V. 13. P. 102.
 21. Villanueva-Meyer J. E., Mabray M. C., Cha S. Current Clinical Brain Tumor Imaging. *Neurosurgery*. 2017. V. 81, no. 3. P. 397–415. <https://doi.org/10.1093/neuros/nyx103>

References

1. Batalov A. I., Zakharova N. E., Pogosbekyan E. L., Fadeeva L. M., Goryaynov S. A., Baev A. A., Shul'ts E. I., Chelushkin D. M., Potapov A. A., Pronin I. N. Non-contrast ASL perfusion in preoperative diagnosis of supratentorial gliomas. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii Imeni N. N. Burdenko*. 2018;82(6):15-22. (In Russ., In Engl.) <https://doi.org/10.17116/neiro20188206115>
2. Zakharova N. E., Pronin I. N., Batalov A. I., Shul'ts E. I., Tyurina A. N., Baev A. A., Fadeeva L. M. Modern standards

- for magnetic resonance imaging of the brain tumors. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii Imeni N. N. Burdenko*. 2020;84(3): 102-112. (In Russ., In Engl.) <https://doi.org/10.17116/neiro202084031102>
3. Pronin I. N., Zakharova N. E., Fadeeva L. M., Pronin A. I., Shul'ts E. I., Batalov A. I. SWI/SWAN pulse sequence in MR imaging of microhemorrhages and vascular malformations. *Onkologicheskij zhurnal: lucheвая diagnostika, lucheвая terapiya*. 2018;1(3):49-59. (In Russ.)
4. Pronin I. N., Zakharova N. E., Batalov A. I., Schul'ts E. I., Tyurina A. N., Baev A. A., Fadeeva L. M. Diagnostic standards in diagnostics of brain disorders. Kremlevskaya medicina. *Klinicheskij vestnik*. 2020;1:107-118. (In Russ.)
5. Batalov A. I., Zakharova N. E., Pronin I. N., Belyaev A. Yu., Pogosbekyan E. L., Goryaynov S. A., Bykanov A. E., Tyurina A. N., Shevchenko A. M., Solozhentseva K. D., Nikitin P. V., Potapov A. A. 3D pCASL-perfusion in preoperative assessment of brain gliomas in large cohort of patients. *Sci. Rep.* 2022;12:2121. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05992-4>
6. Ellingson B., Bendszus M., Boxerman J., Barboriak D., Erickson B., Smits M., Nelson S., Gerstner E., Alexander B., Goldmacher G. et al. Consensus recommendations for a standardized Brain Tumor Imaging Protocol in clinical trials. *Neuro Oncol.* 2015;17(9):1188-1198. <https://doi.org/10.1093/neuonc/nov095>
7. Gühr G., Horvath-Rizea D., Kohlhof-Meinecke P., Ganslandt O., Henkes H., Härtig W., Donitza A., Skalej M., Schob S. Diffusion Weighted Imaging in Gliomas: A Histogram-Based Approach for Tumor Characterization. *Cancers*. 2022; 14(14):3393.
8. Guida L., Stumpo V., Bellomo J., van Niftrik C. H. B., Sebök M., Berhouma M., Bink A., Weller M., Kulcsar Z., Regli L. et al. Hemodynamic Imaging in Cerebral Diffuse Glioma-Part A: Concept, Differential Diagnosis and Tumor Grading. *Cancers*. 2022;14(14):1432.
9. Hong E. K., Choi S. H., Shin D. J., Jo S. W., Yoo R. E., Kang K. M., Yun T. J., Kim J. H., Sohn C. H., Park S. H. et al. Radiogenomics correlation between MR imaging features and major genetic profiles in glioblastoma. *Eur. Radiol.* 2018; 28(10):4350-4361. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5400-8>
10. Iv M., Bisdas S. Neuroimaging in the Era of the Evolving WHO Classification of Brain Tumors, From the AJR Special Series on Cancer Staging. *AJR Am. J. Roentgenol.* 2021;217(1):3-15. <https://doi.org/10.2214/AJR.20.25246>
11. Jain R., Essig M. Brain tumor imaging. New York, Stuttgart, Delhi, Rio de Janeiro Thieme. 2016. <https://doi.org/10.1055/b-0035-122291>
12. Kang X. W., Xi Y. B., Liu T. T., Wang N., Zhu Y. Q., Wang X. R., Guo F. Grading of Glioma: Combined diagnostic value of amide proton transfer weighted, arterial spin labeling and diffusion weighted magnetic resonance imaging. *BMC Med. Imaging*. 2020;20:50.
13. Kaufmann T. J., Smits M., Boxerman J., Huang R., Barboriak D. P., Weller M., Chung C., Tsien C., Brown P. D., Shankar L., Galanis E., Gerstner E., van den Bent M. J., Burns T. C., Parney I. F., Dunn G., Brastianos P. K., Lin N. U., Wen P. Y., Ellingson B. M. Consensus recommendations for a standardized brain tumor imaging protocol for clinical trials in brain metastases. *Neuro. Oncol.* 2020;22(6):757-772. <https://doi.org/10.1093/neuonc/noaa030>
14. Mabray M., Barajas R.F., Cha S. Modern brain tumor imaging. *Brain. Tumor. Res. Treat.* 2015;3(1):8-23. <https://doi.org/10.14791/btrt.2015.3.1.8>
15. Malik D. G., Rath T. J., Urcuyo Acevedo J. C., Canoll P. D., Swanson K. R., Boxerman J. L., Quarles C. C., Schmainda K. M., Burns T. C., Hu L. S. Advanced MRI Protocols to Discriminate Glioma From Treatment Effects: State of the

- Art and Future Directions. *Front. Radiol.* 2022;2:809373. <https://doi.org/10.3389/fradi.2022.809373>
16. Martucci M., Russo R., Schimperna F., D'Apolito G., Panfili M., Grimaldi A., Perna A., Ferranti A. M., Varcasia G., Giordano C. et al. Magnetic Resonance Imaging of Primary Adult Brain Tumors: State of the Art and Future Perspectives. *Biomedicines*. 2023;11(2):364. <https://doi.org/10.3390/biomedicines11020364>
17. Osborn A. G., Louis D. N., Poussaint T. Y., Linscott L. L., Salzman K. L. The 2021 World Health Organization Classification of Tumors of the Central Nervous System: What Neuroradiologists Need to Know. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2022;43(7):928-937. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A7462>
18. Stumpo V., Guida L., Bellomo J., Van Niftrik C. H. B., Sebö, M., Berhouma M., Bink A., Weller M., Kulcsar Z., Regli L. et al. Hemodynamic Imaging in Cerebral Diffuse Glioma-Part B: Molecular Correlates, Treatment Effect Monitoring, Prognosis, and Future Directions. *Cancers*. 2022;14(5):1342. <https://doi.org/10.3390/cancers14051342>
19. Thust S. C., Hassanein S., Bisdas S., Rees J. H., Hyare H., Maynard J. A., Brandner S., Tur C., Jäger H. R., Yousry T. A. et al. Apparent diffusion coefficient for molecular subtyping of non-gadolinium-enhancing WHO grade II/III glioma: Volumetric segmentation versus two-dimensional region of interest analysis. *Eur. Radiol.* 2018;28:3779-3788. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5351-0>
20. Van Santwijk L., Kouwenberg V., Meijer F., Smits M., Henssen D. A systematic review and meta-analysis on the differentiation of glioma grade and mutational status by use of perfusion-based magnetic resonance imaging. *Insights Imaging*. 2022;13:102.
21. Villanueva-Meyer J. E., Mabray M. C., Cha S. Current Clinical Brain Tumor Imaging. *Neurosurgery*. 2017;81(3):397-415. <https://doi.org/10.1093/neuros/nyx103>

Сведения об авторах / Information about the authors

Захарова Наталья Евгеньевна, доктор медицинских наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, Москва, 4-я Тверская-Ямская, 16.

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: определение концепции и дизайн работы, поиск источников, анализ и интерпретация данных, написание текста, подготовка иллюстраций, редактирование.

Zakharova Natal'ya Evgen'evna, radiologist, PhD, professor RAS, Department of Neuroradiology, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

+7 (499) 972-85-55

Contribution of the author: conception and design of the work, source searching, data analysis and interpretation, manuscript drafting, preparation of figures, editing.

Пронин Игорь Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, заведующий отделением рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, г. Москва, 4-я Тверская-Ямская улица, д. 16.

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: анализ и интерпретация данных, редактирование, утверждение окончательного варианта публикации.

Pronin Igor Nikolaevich, M. D., D. Sci., Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of Department of Neuroradiology N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

+7 (499) 972-85-55

Contribution of the author: data analysis and interpretation, editing, final approval.

Баталов Артем Игоревич, рентгенолог, кандидат медицинских наук, научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, Москва, 4-я Тверская-Ямская, 16.

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: определение концепции и дизайн работы, подготовка иллюстраций, редактирование.

Batalov Artem Igorevich, radiologist, PhD, Department of Neuroradiology, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

+7 (499) 972-85-55

Contribution of the author: conception and design of the work, preparation of figures, editing.

Чехонин Иван Владимирович, кандидат медицинских наук, рентгенолог, младший научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, г. Москва, 4-я Тверская-Ямская ул, д. 16.

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: дизайн работы, анализ и интерпретация данных, написание текста, редактирование.

Chekhonin Ivan Vladimirovich, radiologist, Ph. D. Med., junior research associate, Department of Neuroradiology, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

+7 (499) 972-85-55

Contribution of the author: conception and design of the work, data analysis and interpretation, editing.

Тюрина Анастасия Николаевна, рентгенолог, кандидат медицинских наук, научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, Москва, 4-я Тверская-Ямская, 16.

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: определение концепции и дизайн работы, анализ данных.

Tyurina Anastasia Nikolaevna, radiologist, PhD, Department of Neuroradiology, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

+7 (499) 972-85-55

Contribution of the author: conception and design of the work, data analysis

Финансирование исследования и конфликт интересов

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-75-10074, <https://rscf.ru/project/22-75-10074/>

Авторы заявляют, что данная работа, ее тема, предмет и содержание не затрагивают конкурирующих интересов. Мнения, изложенные в статье, принадлежат авторам рукописи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Funding for the study and conflicts of interest

This research was funded by Russian Science Foundation grant № 22-75-10074 (<https://rscf.ru/project/22-75-10074/>).

The authors declare that this paper, its topic, subject matter, and content do not involve competing interests. The views expressed in the article are those of the authors of the manuscript. The authors attest that they meet the ICMJE international criteria for authorship (all authors contributed substantially to the conceptualization, preparation of the article, and read and approved the final version before presentation).

Статья поступила в редакцию 26.10.2023;
одобрена после рецензирования 06.12.2023;
принята к публикации 15.01.2024.

The article was submitted 26.10.2023;
approved after reviewing 06.12.2023;
accepted for publication 15.01.2024.