



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Оригинальная статья

УДК 616.8-006

<https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-20-36>

Исследования перифокальной зоны глиом головного мозга с помощью магнитно-резонансной томографии (обзор литературы)

Н. Е. Захарова¹, А. И. Баталов², Э. Л. Погосбемян³, С. А. Горяйнов⁴,
Л. М. Фадеева⁵, А. Е. Быканов⁶, А. Н. Тюрина⁷, И. В. Чехонин⁸,
С. А. Галстян⁹, И. Н. Пронин¹⁰, Д. Ю. Усачев¹¹

ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия

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

² abatalov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8924-7346>

³ epogosbekyan@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4803-6948>

⁴ sgoraynov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6480-3270>

⁵ lmf@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3240-5585>

⁶ abykanov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0588-4779>

⁷ aturina@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2333-7867>

⁸ ivan.chekhonorin@gmail.com, ichekhonorin@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6652-2472>

⁹ sgalstyan@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9953-6654>

¹⁰ pronin@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>

¹¹ dousachev@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9811-9442>

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

Резюме

Представлен обзор литературы и собственный опыт использования современных последовательностей МРТ, в т. ч. диффузионно-куртозисной МРТ, в исследованиях перифокальной зоны глиом. Анализ комплекса диффузионных и перфузионных количественных МР-показателей дает информацию о границах глиом в зонах с сохранным гематоэнцефалическим барьером, не накапливающих контрастный препарат. Дифференцирование «чистого» перифокального вазогенного отека и отека с инфильтрацией клетками глиомы, а также выявление участков опухолевой инфильтрации в перитуморальном интактном, по данным МРТ, веществе мозга при глиомах высокой степени злокачественности дают возможность определить истинную распространенность опухоли. Полученные данные позволят разра-

© Захарова Н. Е., Баталов А. И., Погосбемян Э. Л., Горяйнов С. А., Фадеева Л. М., Быканов А. Е., Тюрина А. Н., Чехонин И. В., Галстян С. А., Пронин И. Н., Усачев Д. Ю., 2024

батывать персонализированный навигационный алгоритм для хирургического удаления опухоли и последующий индивидуальный план лучевой и химиотерапии, а также прогнозировать течение заболевания.

Ключевые слова: диффузионно-куртозисная МРТ, ASL-перфузия, головной мозг, глиомы

Для цитирования: Захарова Н. Е., Баталов А. И., Погосбекян Э. Л., Горяйнов С. А., Фадеева Л. М., Быканов А. Е., Тюрин А. Н., Чехонин И. В., Галстян С. А., Пронин И. Н., Усачев Д. Ю. Исследования перифокальной зоны глиом головного мозга с помощью магнитно-резонансной томографии (обзор литературы) // Радиология — практика. 2024;1:20-36. <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-20-36>

ORIGINAL RESEARCH

Original research

Magnetic Resonance Imaging in Studies of Perifocal Zone of Brain Gliomas (a Literature Review)

N. E. Zakharova¹, A. I. Batalov², E. L. Pogosbekyan³, S. A. Goryaynov⁴,
L. M. Fadeeva⁵, A. E. Bykanov⁶, A. N. Tyurina⁷, I. V. Chekhonin⁸,
S. A. Galstyan⁹, I. N. Pronin¹⁰, D. Yu. Usachev¹¹

Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

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

²abatalov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8924-7346>

³epogosbekyan@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4803-6948>

⁴sgoraynov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6480-3270>

⁵lmf@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3240-5585>

⁶abykanov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0588-4779>

⁷aturina@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2333-7867>

⁸ivan.chekhonorin@gmail.com, [ichekhonorin@nsi.ru, https://orcid.org/0000-0002-6652-2472](https://orcid.org/0000-0002-6652-2472)

⁹sgalstyan@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9953-6654>

¹⁰pronin@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>

¹¹dousachev@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9811-9442>

Corresponding author: Natalia E. Zakharova, nzakharova@nsi.ru

Abstract

This review provides insight into application of modern MRI modalities including diffusion kurtosis imaging in assessment of perifocal glioma zone. Differentiation of “pure” perifocal vasogenic edema from edema infiltrated by glioma cells, as well as identification of peritumoral intact (on conventional MRI) brain matter infiltration make it possible to determine glial tumor borders more accurately. Analysis of diffusion and perfusion quantitative

MR data allow determining glioma borders in areas with unaltered blood-brain barrier. There is a growing possibility to develop a personalized navigation algorithm for surgical removal of the tumor, followed by the determination of an individual plan for radiation and chemotherapy, as well as prediction of disease outcomes.

Keywords: Diffusion-kurtosis Mri, Asl-perfusion, Brain, Glioma

For citation: Zakharova N. E., Batalov A. I., Pogosbekyan E. L., Goryaynov S. A., Fadeeva L. M., Bykanov A. E., Tyurina A. N., Chekhonin I. V., Galstyan S. A., Pronin I. N., Usachev D. Yu. Magnetic Resonance Imaging in studies of perifocal zone of brain gliomas (a literature review). *Radiology – Practice*. 2024;1:20-36. (In Russ.). <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-20-36>

Список сокращений и пояснения

ДТ МРТ — диффузионно-тензорная МРТ

ДК МРТ — диффузионно-куртозисная МРТ

ДВИ — диффузионно-взвешенные изображения

FA — fractional anisotropy — фракционная анизотропия (ФА)

МК — mean kurtosis — средний куртозис

АК — axial kurtosis — аксиальный куртозис

РК — radial kurtosis — радиальный куртозис

КА — kurtosis anisotropy — куртозисная анизотропия

AWF — axonal water fraction — фракция аксональной воды

AxIAD — axial intraaxonal diffusion — аксиальная интрааксональная диффузия

ADC — apparent diffusion coefficient — измеряемый коэффициент диффузии

MD — mean diffusion — средняя диффузия

CBV (nCBV) — cerebral blood volume (normalized CBV) — регионарный объем крови (нормализованный объем крови) при перфузии

HGG — high grade glioma — глиома высокой степени злокачественности

Перифокальный отек (отек-инфильтрация) — зона повышения МР-сигнала в Т2- и Т2-FLAIR-режимах перифокально части опухоли, накапливающей контрастный препарат

Перитуморальная зона — вещество мозга за пределами зоны изменения МР-сигнала на всех стандартных МРТ изображениях

Введение

Средняя продолжительность жизни пациентов с глиомами высокой степени злокачественности, а особенно с глиобластомами, несмотря на современное комбинированное лечение, до сих пор остается невысокой, составляя всего 12–15 месяцев [4, 7]. Этому способству-

ет прогностически абсолютно неблагоприятный инфильтративный характер роста глиом и диффузное поражение структур мозга.

Известно, что глиомы высокой степени злокачественности распространяются за пределы контрастируемого при МРТ и обычно удаляемого во вре-

мя операции фрагмента опухоли. При этом часть глиомы, не накапливающая контрастный препарат, инфильтрирует перифокальный отек. Оценка распространенности неконтрастируемой части опухоли обязательна при исследовании пациентов с глиомами, особенно при постоперационной динамике [7, 9]. Однако изменения, обусловленные инфильтрацией клетками опухоли перифокального вазогенного отека, не визуализируются при использовании стандартных МРТ-протоколов, что приводит к субоптимальному их удалению и ухудшению прогноза. При аутопсии опухолевые клетки глиом высокой степени злокачественности выявляются на отдалении от основной части опухоли и зоны изменения МР-сигнала по T2-взвешенным изображениям [25]. В то же время расширение области резекции или даже gross-total резекция глиом высокой степени злокачественности является одним из основных условий увеличения продолжительности жизни пациентов [21].

Дифференцирование «чистого» перифокального вазогенного отека и отека с инфильтрацией клетками глиомы, а также выявление участков опухолевой инфильтрации в перитуморальном интактном (по данным МРТ) веществе мозга при глиомах высокой степени злокачественности позволило бы более точно определить истинную распространенность опухоли, планировать персонализированное нейрохирургическое лечение и лучевую терапию [26].

Методики МРТ, применяемые в оценке распространенности глиом

Для определения распространенности глиом в разных исследованиях применялись различные последовательности МРТ, в том числе количественные — диффузионно-взвешенные, релаксметрические и перфузионные. На основе диффузионно-взвешенных

изображений (ДВИ) возможно определить градиент коэффициента диффузии в перифокальном отеке как признак опухолевой инфильтрации (вследствие плотноклеточности опухоли) [16]. Количественный анализ при МР-релаксометрии выявил изменения, указывающие на опухолевую инвазию в перифокальном отеке при злокачественных глиомах [7].

При КТ- и МР-перфузии повышение объемного кровотока и объема крови отражает наличие неоангиогенеза, индуцированного опухолью. Ранее была доказана возможность дифференцирования глиом высокой и низкой степени злокачественности при помощи рCASL-перфузии [1, 5]. На основе перфузионных методов была выявлена возможность дифференцирования глиобластом и метастазов, глиобластом и лимфом, а также был исследован перитуморальный отек [6, 22].

В своих работах Баталов А. И. и соавт. (2018), Batalov A. I. et al. (2022), Zakharova N. et al. (2023) использовали методику бесконтрастной МР-перфузии рCASL, которая показала, что объемный кровоток в зоне активного роста глиомы был достоверно выше по сравнению с зоной перифокального отека-инфильтрации, что говорит о выраженном неоангиогенезе в строме опухоли. По мнению авторов, биопсия должна проводиться из участка наибольшего кровотока, определенного при помощи рCASL-методики МР-перфузии [1, 5, 26].

Значимые изменения параметра фракционной анизотропии (FA) диффузионно-тензорной МРТ (ДТ МРТ) были выявлены при изучении опухолевого перифокального отека [17].

Несмотря на диагностические возможности современных МРТ-технологий, все эти методики не могут однозначно определить истинные границы инфильтрации мозгового вещества опухолевыми клетками. Исследование

глиом остается сложным процессом, а результаты исследований часто трудно интерпретировать.

Диффузионно-куртозисная МРТ в оценке глиом головного мозга

Диффузионно-куртозисная МРТ (ДК МРТ) позволяет изучать негауссовское распределение диффузии воды, более точно *in vivo* отражая сложную микроструктуру тканей по сравнению с другими количественными методами нейровизуализации [11, 23]. Согласно многим исследованиям, параметры ДК МРТ являются неинвазивными биомаркерами градации глиом [3, 14, 17–19]. Все эти работы преимущественно направлены на дифференциацию глиом различной степени злокачественности и показывают высокую эффективность ДК МРТ [3].

Средний куртозис (МК) — наиболее изученный параметр ДК МРТ — в исследованиях показал достоверную точность при дифференцировании глиом высокой и низкой степени злокачественности, он более чувствителен, чем стандартные диффузионные показатели, к изменениям микроструктуры тканей мозга, так как диффузия воды в биологических тканях не следует гауссовскому распределению [8].

Однако описание сложной микроструктуры тканей мозга не должно быть ограничено одним параметром. ДК МРТ имеет ряд других значимых параметров, например, радиальный куртозис (РК), снижение которого показывает повышенную диффузию в радиальном направлении вследствие повреждения миелиновых оболочек, клеточных мембран, разрыва аксонов [23]. Аксиальный куртозис (АК) определяет движение молекул воды вдоль аксиального направления диффузионного эллипсоида, т. е. параллельно аксону. Повышение этого параметра указывает на нарушение структуры

тканей и косвенно — на внутриклеточные повреждения [23].

По данным разных авторов и нашим данным, фракционная анизотропия (FA) ДТ МРТ — достаточно надежный показатель, отражающий интегрированность белого вещества, который всегда снижается при нарушении структуры проводящих путей. Таким же надежным представляется показатель «куртозисная анизотропия» (КА) ДК МРТ, показывающий тканевую анизотропию в зонах со сложным пересечением волокон белого вещества, которую недооценивает фракционная анизотропия [13, 26].

Исследование перифокального отека инфильтрации глиом с помощью ДК МРТ дает возможность получения более точных данных по сравнению с ДВИ и ДТ МРТ, дифференцируя отек с инфильтрацией от чистого вазогенного перифокального отека, например, при глиобластомах и метастазах. Инфильтрированное мозговое вещество имеет более сложную структуру при наличии опухолевых клеток, глиоза, отека, новообразованных сосудов, что, по данным разных исследований, приводит к повышению параметра среднего куртозиса по сравнению с зонами чистого отека, в которых МК ниже [2, 17, 24].

Tan Y. et al. (2015) в своей работе исследовали параметры МК, РК, АК, а также FA и MD в солидной части опухоли и перифокальном отеке при дифференциации high grade глиом и солитарных метастазов, при этом в солидной части опухоли не было найдено достоверного различия параметров между двумя группами, т. к., по мнению авторов, опухолевые массы солидной части замещают разрушенное белое вещество мозга как при глиомах, так и при метастазах. В перифокальном отеке МК, РК, АК были достоверно выше при HGG по сравнению с метастазами, т. к. структура в отеке при астроцитомах более сложная, чем при метастазах по причине инфильтрации ее опухолевыми клетками [24]. Параметры АК и РК, по данным Tan

Y. et al. (2015), выше в перифокальном отеке при астроцитомах, так как опухолевые клетки ограничивают диффузию как в аксиальном, так и в радиальном направлении. В исследовании Tan Y. et al. (2015) чувствительность и специфичность параметра АК была выше, чем РК, что, вероятно, говорит о том, что ограничение диффузии в аксиальном направлении (вдоль аксона) было более очевидно, чем в радиальном (поперек), или что параметр АК более чувствительный к изменениям в ограничении диффузии. Гистологического подтверждения изменений в перифокальном отеке в этой работе не проводилось.

Qiu J. et al. (2022) в исследовании 40 пациентов с глиомами grade 3 и 4 получили корреляции МК, АК, РК с параметром Ki-67 (индекс пролиферативной активности) в солидной части опухоли, а также достоверные различия этих параметров в перифокальном отеке для глиом grade 3 и 4. Эти авторы не нашли корреляций исследуемых параметров с Ki-67 в зоне отека, а также не сделали из этой зоны биопсию [20].

В работе Delgado A. et al. (2017) у 35 больных с астроцитомами и олигодендроглиомами, grade 2 и 3, при помощи ДК МРТ были исследованы диффузионные параметры в перитуморальном, неизменном (по данным МРТ) белом веществе по сравнению с противоположным, непораженным полушарием мозга, а также был определен гистологический подтип опухолей и степень малигнизации. Авторы обнаружили достоверное различие ДК-МРТ-параметров в перитуморальном белом веществе и в противоположном нормальном полушарии, т. е. обнаружили изменения, которые не видны на структурных МРТ. По результатам этой работы такие параметры, как МК, РК, FA, повышались в перитуморальном белом веществе мозга и в противоположном полушарии [8].

Для исследований белого вещества мозга при помощи ДК МРТ была

предложена идеализированная двухкомпонентная модель, которая допускает существование изолированного интрааксонального пространства (аксоны — это бесконечно длинные тонкие цилиндры), а также экстрааксонального пространства. Диффузионного обмена между интра- и экстрааксональными пространствами нет, а миелиновая оболочка условно непроницаема для воды [11], поэтому диффузию исследуют отдельно в этих пространствах. Для описания двухкомпонентной модели используют параметры интра- и экстрааксональной аксиальной и радиальной диффузии (AxIAD, AxEAD, RadIAD и RadEAD), извитости экстрааксонального пространства (TORT), а также фракции аксональной воды (AWF). Grossman E. et al. (2015) в своей работе показали, что AxEAD и RadEAD являются возможными маркерами внеклеточного воспаления, глиоза, а также в целом демиелинизации. Фракция аксональной воды — маркер потери аксонов — показывает отношение объема воды в интрааксональном пространстве к сумме объемов воды в интра- и экстрааксональном пространстве, исключая миелин. Извитость экстрааксонального пространства (TORT) — это потенциальный маркер демиелинизации. Эти параметры не информативны для серого вещества, так как двухкомпонентная модель для данной структуры не применима [11].

С использованием всех возможных параметров ДК МРТ Туркин А. М. и соавт. (2017) ранее показали, что перифокальный вазогенный отек при глиомах высокой степени злокачественности в отличие от метастазов инфильтрирован опухолевыми клетками [2].

Таким образом, в перифокальном отеке диффузионно-куртозисные параметры белого вещества изменены благодаря наличию вазогенного отека и опухолевой инфильтрации. Но за

пределами измененного МР-сигнала по T2-FLAIR-изображениям патологическое изменение ДК МРТ параметров белого вещества, по нашему мнению, может быть обусловлено инфильтрацией опухолевыми клетками [26].

Мультипараметрические исследования

Мультипараметрический анализ применялся ранее не только для исследования перифокальной опухолевой инфильтрации, но и для прогнозирования направления продолженного роста глиобластом [2, 4, 15, 24]. Целью этих исследований было *in vivo* получение патофизиологической информации о неоангиогенезе, целостности белого вещества и клеточной пролиферации при помощи количественных МРТ-параметров [17].

В работе Gates E. D. H. et al. (2020) авторы предприняли попытку градации глиом с применением машинного обучения при помощи дооперационных МРТ и специфических (виртуальных) данных биопсии в противоположном, не пораженном полушарии (зеркально зоне биопсии опухоли). Зону «виртуальной» биопсии авторы определили как референсную. МРТ-исследования включали не только анатомические изображения, но и диффузионные, перфузионные последовательности, исследование проницаемости, а затем проводилась стереотаксическая биопсия опухоли до ее удаления. Было исследовано 23 пациента с глиомами, grade 2, 3, 4. Степень злокачественности опухолей была показана с 96 % точностью при применении 4 параметров — T2, ADC, CBV и константы переноса при DCE перфузии (dynamic contrast enhanced, перфузия с динамическим контрастированием). В своей работе они указали, что хотели бы получить образцы тканей из перифокального отека и перитуморального нормального вещества мозга, но этический комитет их не поддержал [10].

Мультипараметрический анализ, включающий T1, T1 с контрастным препаратом, T2, T2-FLAIR, диффузионно-тензорную МРТ, DSC-перфузию, машинное обучение, проведенный Akbari H. et al. (2016) для исследования глиобластом, продемонстрировал гетерогенность перитуморальной области и паттерны опухолевой инфильтрации, прогнозирующие последующее направление распространения опухоли. Однако при этом исследовании не были получены образцы тканей из перитуморальных зон предполагаемой инфильтрации (вне зоны изменения МР-сигнала). Предложенная авторами модель позволяет прогнозировать участки продолженного роста опухоли, но распространения опухоли по этим вероятным направлениям затем не было обнаружено при МРТ в динамике. Однако такой вектор работ, по нашему мнению, интересный и перспективный, требует дальнейшего изучения [4].

В работе Kim J. Y. et al. (2019) перифокальную зону, не накапливающую контрастный препарат, у 83 пациентов с глиобластомами исследовали с использованием модели радиомики, комбинируя показатели FA и pCBV (нормализованного объема крови, полученного при DSC-перфузии). Эта модель показала высокий прогностический уровень для 6-месячной прогрессии опухоли. Однако авторами не были получены молекулярные данные, а также отсутствовала возможность подтвердить количественные данные морфологическими, получив из всей достаточно обширной исследуемой зоны образцы тканей, а также не исследовалась перитуморальная зона без изменения МР-сигнала [15].

Исследования перифокальной зоны глиом с применением биопсии

К настоящему времени только в нескольких исследованиях были представлены сопоставления данных

МРТ-исследования и гистологических данных за пределами видимых границ опухоли [12, 27], которые были выполнены небольшим группам пациентов преимущественно с глиомами низкой степени злокачественности либо в смешанных группах – низкой и высокой степени злокачественности, тогда как postmortem исследования у пациентов с high grade глиомами показали опухолевые клетки на большом расстоянии от основного узла опухоли [25].

Фундаментальной задачей исследования Zakharova N. et al. (2023) явилась оценка распространенности инфильтративной части high grade глиом в зонах с сохранным гематоэнцефалическим барьером. Эта оценка была проведена для 50 пациентов с глиомами grade 3 и 4 с помощью широкого спектра показателей, полученных при ДК МРТ, а также скорости объемного мозгового кровотока, полученного при помощи pCASL-перфузии. Исследуемые параметры были определены в области активного роста глиальных опухолей с нарушенным гематоэнцефалическим барьером и накоплением МР-контрастного препарата в зоне перифокального отека-инфильтрации, в перитуморальных интактных тканях пораженного полушария мозга (по стандартным МРТ) по ходу планируемого хирургического доступа, а также в белом веществе контралатерального, непораженного полушария мозга. Количественная оценка сопровождалась взятием биопсии до удаления опухоли из трех вышеуказанных зон интереса пораженного полушария и получением в этих зонах иммуногистохимических и молекулярно-генетических характеристик. Авторы получили достоверные изменения (повышение одних/понижение других) исследуемых параметров MD, FA, MK, RK, KA, AWF, AxIAD в сторону нормальных значений для всей группы пациентов в контралатеральном полушарии по сравнению с интактным, перитуморальным веществом мозга,

что указывает на изменение структуры интактных тканей мозга, вероятную инфильтрацию ее клетками глиомы в пораженном полушарии и возможное отсутствие опухолевых клеток в контралатеральном полушарии. Такие изменения не выявляются на рутинных МРТ, но определяются, как показала эта работа, при помощи ДК МРТ. Биопсия из перифокальной зоны отека-инфильтрации глиом и перитуморального неизмененного вещества мозга по ходу хирургического доступа подтвердила наличие опухолевых клеток в тканях [26]. Результаты исследования можно будет применить в дальнейшем для составления индивидуальных карт опухолевой инвазии с целью планирования хирургического и лучевого лечения пациентов с глиомами головного мозга (рис.).

Заключение

В настоящее время все более широко используются методы радиомики и сегментации патологических тканей, которые в некоторой степени исключают возможный bias-эффект исследования при выборе вручную зон интереса. Однако получение гистологических данных (стереотаксическая биопсия) подразумевает именно выбор зоны интереса, а исследование количественных характеристик из зон биопсии наиболее достоверно отражает состояние тканей в изучаемом регионе. Хотя, вероятно, опухоль может развиваться и инфильтрировать ткани мозга в противоположном направлении от иногда единственно возможного участка для биопсии по ходу операционного доступа с неизменным МРТ-сигналом, т. к. опухолевая инфильтрация при глиомах распространяется неравномерно по отношению к основному узлу опухоли.

Следует отметить, что параметры диффузионного куртозиса до сих пор являются предметом исследовательских работ и не используются в повседневной практике в связи с длительным процес-

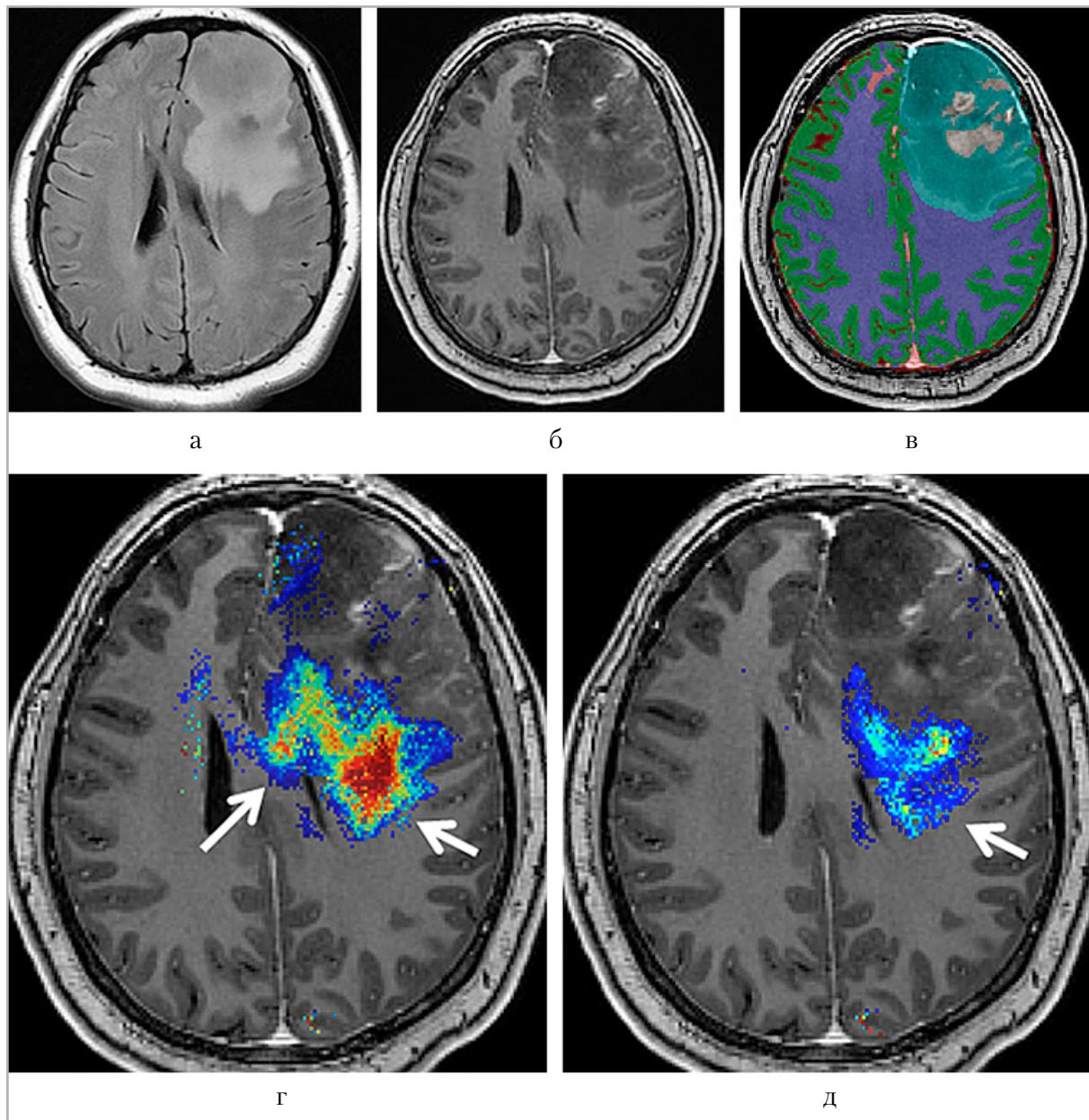


Рис. МРТ-исследование пациентки, 33 года, с глиобластомой, grade 4, при биопсии по ходу операционного доступа в интактном перитуморальном веществе мозга (по данным МРТ) получены клетки глиобластомы. *а* — аксиальный срез в режиме T2-FLAIR — в левой лобной доле определяется диффузно растущая внутримозговая опухоль; *б* — аксиальный срез в режиме T1 после введения контрастного препарата, опухоль гетерогенно накапливает контрастный препарат; *в* — сегментация опухоли по T1+Gd, T2, T2-FLAIR с выделением зоны некроза, контрастируемой части, отека-инфильтрации. При сопоставлении обработанных параметрических карт и структурных изображений на картах фракции аксональной воды (*г*) и среднего куртозиса (*д*) определяются участки патологического изменения параметров за пределами сегментированной зоны изменения МР-сигнала, что не исключает наличие в этих участках инфильтративной части опухоли, не видимой на стандартных последовательностях

сом получения данных, а также трудо- и времязатратной постобработкой. В то же время мы думаем, что применение

комплекса параметров ДК МРТ дает возможность более полного понимания структурных изменений.

Мы полагаем, что анализ комплекса диффузионных (ДТ и ДК МРТ) и перфузионных количественных МР-показателей позволит более точно определить границы глиом высокой степени злокачественности в зонах с сохранным гематоэнцефалическим барьером, не накапливающих контрастный препарат. Знания о распространенности опухоли, в свою очередь, позволяют разрабатывать персонализированный навигационный алгоритм для хирургического удаления опухоли с последующим определением индивидуального плана лучевой и химиотерапии, а также с возможностью прогнозирования течения заболевания.

Список источников

1. Баталов А. И., Захарова Н. Е., Погосбекян Э. Л., Фадеева Л. М., Горайнов 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 // Журнал «Вопросы нейрохирургии» имени Н. Н. Бурденко. 2018. Т. 82, № 6. С.15–22. <https://doi.org/10.17116/neiro20188206115>
2. Туркин А. М., Погосбекян Э. Л., Тоноян А. С., Шульц Е. И., Максимов И. И., Долгушин М. Б., Хачанова Н. В., Фадеева Л. М., Мельникова-Пицхелаури Т. В., Пицхелаури Д. И., Пронин И. Н., Корниенко В. Н. Диффузионная куртозисная МРТ в оценке перитуморального отека глиобластом и метастазов в головной мозг // Мед. Виз. 2017. № 4. С. 97–112. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-2017-4-97-112>
3. Abdalla G., Dixon L., Sanverdi E., Machado P., Kwong J., Panovska-Griffiths J., Rojas-García A., Yoneoka D., Veraart J., Van Cauter S., Abdelkhalek A., Setteim M., Yousry T., Bisdas S. The diagnostic role of diffusional kurtosis imaging in glioma grading and differentiation of gliomas from other intra-axial brain tumours: a systematic review with critical appraisal and meta-analysis. *Neuroradiology*. 2020. V. 62, no. 7. P. 791–802. <https://doi.org/10.1007/S00234-020-02425-9>
4. Akbari H., Macyszyn L., Da X., Bilello M., Wolf R., Martinez-Lage M., Biros G., Alonso-Basanta M., O'Rourke D., Davatzikos C. Imaging surrogates of infiltration obtained via multiparametric imaging pattern analysis predict subsequent location of recurrence of glioblastoma. *Neurosurgery*. 2016. V. 78, no. 4. P. 572–580. <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000001202>
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. Batalov A. I., Afandiev R. M., Zakharova N. E., Pogosbekyan E. L., Shulgina A. A., Kobayakov G. L., Potapov A. A., Pronin I. N. 3D pseudo-continuous arterial spin labeling-MRI (3D PCASL-MRI) in the differential diagnosis between glioblastomas and primary central nervous system lymphomas. *Neuroradiology*. 2022. V. 64. P. 1539–1545. <https://doi.org/10.1007/s00234-021-02888-4>
7. Blystad I., Warntjes J. B. M., Smedby Ö., Lundberg P., Larsson E.-M., Tisell A. Quantitative MRI for analysis of peritumoral edema in malignant gliomas. *PLoS ONE*. 2017. V. 12. No. 5. P.e0177135. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177135>
8. Delgado A. F., Fahlström M., Nilsson M., Berntsson S. G., Zetterling M., Libard S., Alafuzoff I., van Westen D., Lätt J., Smits A., Larsson E. M. Diffusion kurtosis imaging of gliomas grades II and III - a study of perilesional tumor infiltration, tumor grades and subtypes at clinical presentation. *Radiol. Oncol.* 2017. V. 51, no. 2. P. 121–129. <https://doi.org/10.1515/raon-2017-0010>

9. Eisele S. C., Wen P. Y., Lee E. Q. Assessment of brain tumor response: RANO and its offspring. *Curr. Treat. Oncol.* 2016. V. 17, no. 7. P. 35. <https://doi.org/10.1007/s11864-016-0413-5>
10. Gates E. D. H., Lin J. S., Weinberg J. S., Prabhu S. S., Hamilton J., Hazle J. D., Fuller G. N., Baladandayuthapani V., Fuentes D. T., Schellingerhout D. Imaging-based algorithm for the local grading of glioma. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2020. V. 41, no. 3. P. 400–407. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A6405>
11. Grossman E. J., Kirov I. I., Gonen O., Novikov D. S., Davitz M. S., Lui Y. W., Grossman R. I., Inglese M., Fieremans E. N-acetyl-aspartate levels correlate with intra-axonal compartment parameters from diffusion MRI. *NeuroImage.* 2015. V. 118. P. 334–343. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.05.061>
12. Guo J., Yao C., Chen H., Zhuang D., Tang W., Ren G., Wang Y., Wu J., Huang F., Zhou L. The relationship between Cho/NAA and glioma metabolism: implementation for margin delineation of cerebral gliomas. *Acta Neurochir (Wien).* 2012. V. 154, no. 8. P. 1361–1370. <https://doi.org/10.1007/s00701-012-1418-x>
13. Hansen B., Jespersen S. N. Kurtosis fractional anisotropy, its contrast and estimation by proxy. *Sci. Rep.* 2016. No. 6. P. 23999. <https://doi.org/10.1038/srep23999>
14. Hempel J.-M., Schittenhelm J., Bisdas S., Brendle C., Bender B., Bier G., Skardelly M., Tabatabai G., Castaneda Vega S., Ernemann U., Klose U. In vivo assessment of tumor heterogeneity in WHO 2016 glioma grades using diffusion kurtosis imaging: diagnostic performance and improvement of feasibility in routine clinical practice. *J. Neuroradiol.* 2018. V. 45, no. 1. P. 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.neurad.2017.07.005>
15. Kim J. Y., Yoon M. J., Park J. E., Choi E. J., Lee J., Kim H. S. Radiomics in peritumoral non-enhancing regions: fractional anisotropy and cerebral blood volume improve prediction of local progression and overall survival in patients with glioblastoma. *Neuroradiology.* 2019. V. 61, no. 11. P. 1261–1272. <https://doi.org/10.1007/s00234-019-02255-4>
16. Lemercier P., Paz M. S., Patrie J. T., Flors L., Leiva-Salinas C. Gradient of apparent diffusion coefficient values in peritumoral edema helps in differentiation of glioblastoma from solitary metastatic lesions. *AJR Am. J. Roentgenol.* 2014. V. 203, no. 1. P. 163–169. <https://doi.org/10.2214/AJR.13.11186>
17. Martín-Noguerol T., Mohan S., Santos-Armentia E., Cabrera-Zubizarreta A., Luna A. Advanced MRI assessment of non-enhancing peritumoral signal abnormality in brain lesions. *European Journal of Radiology.* 2021. V. 143. P. 109900. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2021.109900>
18. Maximov I. I., Tonoyan A. S., Pronin I. N. Differentiation of glioma malignancy grade using diffusion MRI. *Phys. Med.* 2017. V. 40. P. 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2017.07.002>
19. Pogosbekian E. L., Pronin I. N., Zakharova N. E., Batalov A. I., Turkin A. M., Konakova T. A., Maximov I. I. Feasibility of generalised diffusion kurtosis imaging approach for brain glioma grading. *Neuroradiology.* 2021. V. 63, no. 8. P. 1241–1251. <https://doi.org/10.1007/s00234-020-02613-7>
20. Qiu J., Deng K., Wang P., Chen C., Luo Y., Yuan S., Wen J. Application of diffusion kurtosis imaging to the study of edema in solid and peritumoral areas of glioma. *Magn. Reson. Imaging.* 2022. V. 86. P. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2021.11.001>
21. Sanai N., Polley M. Y., McDermott M. W., Parsa A. T., Berger M. S. An extent of resection threshold for newly diagnosed glioblastomas. *J. Neurosurg.* 2011. V. 115, no. 1. P. 3–8. <https://doi.org/10.3171/2011.2.jns.10998>
22. Solozhentseva K., Batalov A., Zakharova N., Goryaynov S., Pogosbekyan E., Pro-

- nin I. The Role of 3D-pCASL MRI in the Differential Diagnosis of Glioblastoma and Brain Metastases. *Front. Oncol.* 2022. No. 12. P. 874924. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.874924>
23. Steven A. J., Zhuo J., Melhem E. R. Diffusion kurtosis imaging: An emerging technique for evaluating the microstructural environment of the brain. *Am. J. Roentgenol.* 2014. V. 202, no. 1. P. 26–33. <https://doi.org/10.2214/AJR.13.11365>
 24. Tan Y., Wang X.-C., Zhang H., Wang J., Qin J.-B., Wu X.-F., Zhang L., Wang L. Differentiation of high-grade astrocytomas from solitary-brain-metastases: comparing diffusion kurtosis imaging and diffusion tensor imaging. *Eur. J. Radiol.* 2015. V. 84, no. 12. P. 2618–2624. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2015.10.007>
 25. Yamahara T., Numay, Oishi T., Kawaguchi T., Seno T., Asai A., Kawamoto K. Morphological and flow cytometric glioblastoma: a comparison of autopsy brain and neuroimaging. *Brain and Tumor Pathol.* 2010. V. 27. P. 81–87. <https://doi.org/10.1007/s10014-010-0275-7>
 26. Zakharova N. E., Batalov A. I., Pogosbekyan E. L., Chekhonin I. V., Goryaynov S. A., Bykanov A. E., Tyurina A. N., Galstyan S. A., Nikitin P. V., Fadeeva L. M., Usachev D. Yu., Pronin I. N. Perifocal Zone of Brain Gliomas: Application of Diffusion Kurtosis and Perfusion MRI Values for Tumor Invasion Border Determination. *Cancers* 2023. V. 15, no. 10. P. 2760. <https://doi.org/10.3390/cancers15102760>
 27. Zetterling M., Roodakker K. R., Berntsson S. G., Edqvist P. H., Latini F., Landtblom A. M., Pontén F., Alafuzoff I., Larsson E. M., Smits A. Extension of diffuse low-grade gliomas beyond radiological borders as shown by the coregistration of histopathological and magnetic resonance imaging data. *J. Neurosurg.* 2016. V. 125, no. 5. P. 1155–1166. <https://doi.org/10.3171/2015.10.JNS15583>
- ## References
1. Batalov A. I., Zakharova N. E., Pogosbekyan E. L., Fadeeva L. M., Goriaynov 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. Turkin A. M., Pogosbekyan E. L., Tono-yan A. S., Schults E. I., Maximov I. I., Dolgushin M. B., Khachanova N. V., Fadeeva L. M., Melnikova-Pitskhelauri T. V., Pitskhelauri D. I., Pronin I. N., Kornienko V. N. Diffusion kurtosis Imaging in the assessment of peritumoral brain edema in glioblastomas and brain metastases. *Med. Vis.* 2017;4:97-112. (In Russ., in Engl.). <https://doi.org/10.24835/1607-0763-2017-4-97-112>
 3. Abdalla G., Dixon L., Sanverdi E., Machado P., Kwong J., Panovska-Griffiths J., Rojas-García A., Yoneoka D., Veraart J., Van Cauter S., Abdelkhalik A., Setteim M., Yousry T., Bisdas S. The diagnostic role of diffusional kurtosis imaging in glioma grading and differentiation of gliomas from other intra-axial brain tumours: a systematic review with critical appraisal and meta-analysis. *Neuroradiology.* 2020; 62(7):791-802. <https://doi.org/10.1007/S00234-020-02425-9>
 4. Akbari H., Macyszyn L., Da X., Bilello M., Wolf R., Martinez-Lage M., Biros G., Alonso-Basanta M., O'Rourke D., Davatzikos C. Imaging surrogates of infiltration obtained via multiparametric imaging pattern analysis predict subsequent location of recurrence of glioblastoma. *Neurosurgery.* 2016;78(4): 572-580. <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000001202>
 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. Batalov A. I., Afandiev R. M., Zakharova N. E., Pogosbekyan E. L., Shulgina A. A., Kobayakov G. L., Potapov A. A., Pronin I. N. 3D pseudo-continuous arterial spin labeling-MRI (3D PCASL-MRI) in the differential diagnosis between glioblastomas and primary central nervous system lymphomas. *Neuroradiology.* 2022; 64:1539-1545. <https://doi.org/10.1007/s00234-021-02888-4>
 7. Blystad I., Warntjes J. B. M., Smedby Ö., Lundberg P., Larsson E.-M., Tisell A. Quantitative MRI for analysis of peritumoral edema in malignant gliomas. *PLoS ONE.* 2017;12(5):e0177135. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177135>
 8. Delgado A. F., Fahlström M., Nilsson M., Berntsson S. G., Zetterling M., Libard S., Alafuzoff I., van Westen D., Lätt J., Smits A., Larsson E. M. Diffusion kurtosis imaging of gliomas grades II and III – a study of perilesional tumor infiltration, tumor grades and subtypes at clinical presentation. *Radiol. Oncol.* 2017;51(2):121-129. <https://doi.org/10.1515/raon-2017-0010>
 9. Eisele S. C., Wen P. Y., Lee E. Q. Assessment of brain tumor response: RANO and its offspring. *Curr. Treat. Oncol.* 2016;17(7):35. <https://doi.org/10.1007/s11864-016-0413-5>
 10. Gates E. D. H., Lin J. S., Weinberg J. S., Prabhu S. S., Hamilton J., Hazle J. D., Fuller G. N., Baladandayuthapani V., Fuentes D. T., Schellingerhout D. Imaging-based algorithm for the local grading of glioma. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2020. V. 41, no. 3. P. 400–407. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A6405>
 11. Grossman E. J., Kirov I. I., Gonen O., Novikov D. S., Davitz M. S., Lui Y. W., Grossman R. I., Inglese M., Fieremans E. N-acetyl-aspartate levels correlate with intra-axonal compartment parameters from diffusion MRI. *NeuroImage.* 2015; 118:334-343. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.05.061>
 12. Guo J., Yao C., Chen H., Zhuang D., Tang W., Ren G., Wang Y., Wu J., Huang F., Zhou L. The relationship between Cho/NAA and glioma metabolism: implementation for margin delineation of cerebral gliomas. *Acta Neurochir (Wien).* 2012;154(8):1361-1370. <https://doi.org/10.1007/s00701-012-1418-x>
 13. Hansen B., Jespersen S. N. Kurtosis fractional anisotropy, its contrast and estimation by proxy. *Sci. Rep.* 2016;6:23999. <https://doi.org/10.1038/srep23999>
 14. Hempel J.-M., Schittenhelm J., Bisdas S., Brendle C., Bender B., Bier G. Skardelly M., Tabatabai G., Castaneda Vega S., Ernemann U., Klose U. In vivo assessment of tumor heterogeneity in WHO 2016 glioma grades using diffusion kurtosis imaging: diagnostic performance and improvement of feasibility in routine clinical practice. *J. Neuroradiol.* 2018;45(1):32-40. <https://doi.org/10.1016/j.neurad.2017.07.005>
 15. Kim J. Y., Yoon M. J., Park J. E., Choi E. J., Lee J., Kim H. S. Radiomics in peritumoral non-enhancing regions: fractional anisotropy and cerebral blood volume improve prediction of local progression and overall survival in patients with glioblastoma. *Neuroradiology.* 2019; 61(11):1261-1272. <https://doi.org/10.1007/s00234-019-02255-4>
 16. Lemerrier P., Paz M. S., Patrie J. T., Flors L., Leiva-Salinas C. Gradient of apparent diffusion coefficient values in peritumoral edema helps in differentiation of glioblastoma from solitary metastatic lesions. *AJR Am. J. Roentgenol.* 2014;203(1): 163-169. <https://doi.org/10.2214/AJR.13.11186>
 17. Martín-Noguerol T., Mohan S., Santos-Armentia E., Cabrera-Zubizarreta A., Luna A. Advanced MRI assessment of non-enhancing peritumoral signal abnormality in brain lesions. *European Journal of Radiology.* 2021;143:109900. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2021.109900>

18. Maximov I. I., Tonoyan A. S., Pronin I. N. Differentiation of glioma malignancy grade using diffusion MRI. *Phys Med.* 2017;40:24–32. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2017.07.002>
19. Pogosbekian E. L., Pronin I. N., Zakharova N. E., Batalov A. I., Turkin A. M., Konakova T. A., Maximov I. I. Feasibility of generalised diffusion kurtosis imaging approach for brain glioma grading. *Neuroradiology.* 2021. V. 63, no. 8. P. 1241–1251. <https://doi.org/10.1007/s00234-020-02613-7>
20. Qiu J., Deng K., Wang P., Chen C., Luo Y., Yuan S., Wen J. Application of diffusion kurtosis imaging to the study of edema in solid and peritumoral areas of glioma. *Magn Reson Imaging.* 2022;86:610–16. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2021.11.001>
21. Sanai N., Polley M. Y., McDermott M. W., Parsa A. T., Berger M. S. An extent of resection threshold for newly diagnosed glioblastomas. *J. Neurosurg.* 2011;115(1):3–8. <https://doi.org/10.3171/2011.2.JNS.10998>
22. Solozhentseva K., Batalov A., Zakharova N., Goryaynov S., Pogosbekyan E., Pronin I. The Role of 3D-pCASL MRI in the Differential Diagnosis of Glioblastoma and Brain Metastases. *Front. Oncol.* 2022;12:874924. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.874924>
23. Steven A. J., Zhuo J., Melhem E. R. Diffusion kurtosis imaging: An emerging technique for evaluating the microstructural environment of the brain. *Am. J. Roentgenol.* 2014;202(1):26–33. <https://doi.org/10.2214/AJR.13.11365>
24. Tan Y., Wang X.-C., Zhang H., Wang J., Qin J.-B., Wu X.-F., Zhang L., Wang L. Differentiation of high-grade astrocytomas from solitary-brain-metastases: comparing diffusion kurtosis imaging and diffusion tensor imaging. *Eur. J. Radiol.* 2015;84(12):2618–2624. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2015.10.007>
25. Yamahara T., Numay, Oishi T., Kawaguchi T., Seno T., Asai A., Kawamoto K. Morphological and flow cytometric glioblastoma: a comparison of autopsy brain and neuroimaging. *Brain and Tumor Pathol.* 2010;27:81–87. <https://doi.org/10.1007/s10014-010-0275-7>
26. Zakharova N. E., Batalov A. I., Pogosbekian E. L., Chekhonin I. V., Goryaynov S. A., Bykanov A. E., Tyurina A. N., Galstyan S. A., Nikitin P. V., Fadeeva L. M., Usachev D. Yu., Pronin I. N. Perifocal Zone of Brain Gliomas: Application of Diffusion Kurtosis and Perfusion MRI Values for Tumor Invasion Border Determination. *Cancers.* 2023;15(10):2760. <https://doi.org/10.3390/cancers15102760>
27. Zetterling M., Roodakker K. R., Berntsson S. G., Edqvist P. H., Latini F., Landtblom A. M., Pontén F., Alafuzoff I., Larsson E. M., Smits A. Extension of diffuse low-grade gliomas beyond radiological borders as shown by the coregistration of histopathological and magnetic resonance imaging data. *J. Neurosurg.* 2016;125(5):1155–1166. <https://doi.org/10.3171/2015.10.JNS15583>

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, ул. 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, ul. 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.

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, ul. 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.

Погосбемян Эдуард Леонидович, медицинский физик отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская д. 16.
+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: анализ данных, подготовка иллюстраций.

Pogosbekyan Eduard Leonidovich, medical physicist, Department of Neuroradiology, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, ul. 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.
+7 (499) 972-85-55

Contribution of the author: data analysis, preparation of figures.

Горайнов Сергей Алексеевич, нейрохирург, доктор медицинских наук, заведующий лабораторией нейрохирургической анатомии и криоконсервации биологических материалов ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

12504, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская д. 16.
+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: определение концепции и дизайн работы.

Goryaynov Sergey Alexeevich, neurosurgeon, PhD, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, ul. 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.
+7 (499) 972-85-55

Contribution of the author: conception and design of the work.

Фадеева Людмила Михайловна, ведущий инженер отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, 16.
+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: определение концепции и дизайн работы.

Fadeeva Liudmila Mikhaylovna, leading engineer, Department of Neuroradiology, N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, ul. 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.
+7 (499) 972-85-55

Contribution of the author: conception and design of the work.

Быканов Андрей Егорович, кандидат медицинских наук, нейрохирург, научный сотрудник 7-го клинического отделения ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

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

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: определение концепции и дизайн работы.

Bykanov Andrey Egorovich, neurosurgeon, PhD, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

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

+7 (499) 972-85-55

Contribution of the author: conception and design of the work.

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

+7 (499) 972-85-55

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

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, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

+7 (499) 972-85-55

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

Chekhnin Ivan Vladimirovich, Ph.D. Med., radiologist, 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, ul. 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.

Галстян Сюзанна Андраниковна, врач-патологоанатом ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

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

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: анализ данных.

Galstyan Suzanna Andranikovna, pathologist, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

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

+7 (499) 972-85-55

Contribution of the author: data analysis.

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, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16, Россия.

+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, ul. 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

+7 (499) 972-85-55

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

Усачев Дмитрий Юрьевич, доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, директор ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

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

+7 (499) 972-85-10

Вклад автора: анализ данных, утверждение окончательного варианта публикации.

Usachev Dmitriy Yur'evich, MD, PhD, professor, academician of the Russian Academy of Sciences, director of the N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

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

+7 (499) 972-85-10

Contribution of the author: data analysis, final approval.

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).

Research funding and conflict 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 publication).

Статья поступила в редакцию 07.11.2023;
одобрена после рецензирования 07.12.2023;
принята к публикации 09.01.2024.

The article was submitted 07.11.2023;
approved after reviewing 07.12.2023;
accepted for publication 09.01.2024.