

УДК 616.831-001.26/.28-073.7-079.4:616.831-006
<http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2025-16-3-46-53>

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ВЗВЕШЕННЫХ ПО АМИДНОМУ ПРОТОННОМУ ПЕРЕНОСУ, В СТАДИРОВАНИИ ДИФFUЗНЫХ ГЛИОМ: ПРОСПЕКТИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

¹Е. А. Ключев[✉], ^{1,2}М. Б. Сухова[✉], ¹М. В. Растеряева[✉], ¹Л. С. Кухнина[✉], ¹Р. Д. Зинатуллин[✉], ¹А. С. Гришин[✉],
¹М. В. Остапюк[✉], ¹И. А. Медяник[✉], ¹К. С. Яшин[✉]

¹Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород, Россия

²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского,
 Нижний Новгород, Россия

ВВЕДЕНИЕ: Диффузные глиомы являются наиболее распространенными опухолями головного мозга. Глиомы высокой степени злокачественности характеризуются плохим прогнозом и требуют сложного комбинированного лечения. Амидный протонный перенос является современной методикой, позволяющей визуализировать метаболические изменения в опухоли и повысить эффективность МРТ-исследования.

ЦЕЛЬ: Оценить возможности амидного протонного переноса в определении степени злокачественности диффузных глиом головного мозга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ: В исследование включено 73 пациента с гистологически подтвержденными супратенториальными диффузными глиомами взрослого типа, прошедших оперативное лечение в университетской клинике ПИМУ с 2023 по 2025 г. Исследование проводилось на магнитно-резонансном томографе Philips Ingenia Elition X 3T (Нидерланды). Протокол исследования состоял из стандартного протокола и изображений, взвешенных по амидному протонному переносу (АПП-ВИ). Были рассчитаны средние, минимальные и максимальные значения относительной концентрации свободных амидных групп в центральной и периферической части опухоли, абсолютные и нормализованные по неизменному белому веществу. Критерий Манна–Уитни использовался для определения различий между группами пациентов.

РЕЗУЛЬТАТЫ: Абсолютные значения относительной концентрации свободных амидных групп в центральной части опухоли были выше в сравнении с глиомами низкой степени злокачественности: средние — 2,68 [2,07; 3,30] и 1,44 [1,34; 1,92], максимальные 2,96 [2,37; 3,81] и 1,62 [1,49; 2,11], минимальные 2,34 [1,62; 2,86] и 1,25 [1,14; 1,47], $p < 0,05$. Аналогичные различия также были обнаружены в перифокальной зоне — 1,58 [1,28; 1,90], 2,29 [1,85; 2,77], 0,95 [0,61; 1,16] — среднее, максимальное и минимальное значения соответственно у диффузных глиом высокой степени злокачественности и 1,02 [0,83; 1,11], 1,57 [1,21; 1,67], 0,61 [0,36; 0,79] у глиом низкой степени, $p < 0,05$. Нормализованные значения различались только в центральной части опухоли: 3,25 [2,32; 4,86], 5,58 [3,50; 16,42] — средние и максимальные значения у опухолей высокой степени злокачественности и 2,19 [1,68; 3,60], 3,10 [2,36; 12,19] у опухолей низкой степени соответственно, $p < 0,05$. При сравнении 2, 3 и 4 степени по отдельности, была выявлена тенденция к повышению значений сигнала изображений, взвешенных по амидному протонному переносу от Grade 2 к Grade 4, как в центральной части опухоли, так и в периферической.

ОБСУЖДЕНИЕ: Определение степени злокачественности конкретной опухоли на дооперационном периоде является одной из ключевых задач лучевой диагностики, так как позволяет адекватно спланировать лечение, улучшить уровень жизни и увеличить выживаемость. Результаты исследования демонстрируют возможности амидного протонного переноса в стадировании глиальных опухолей. Относительная концентрация свободных амидных групп, определяемая на основании интенсивности сигнала АПП-взвешенных изображений, увеличивается соответственно повышению степени злокачественности, что, вероятно, связано с рядом гистологических и метаболических различий глиом разного грейда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Выявлены статистически значимые различия между значениями относительной концентрации свободных амидных групп в центральной части и перифокальной области у глиальных опухолей с различной степенью злокачественности. Метод амидного протонного переноса является информативным в исследовании пациентов с диффузными глиомами головного мозга.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: магнитно-резонансная томография; амидный протонный перенос; нейровизуализация; глиомы; степень злокачественности

* Для корреспонденции: Ключев Евгений Александрович, e-mail: eugenekluev@yandex.ru

© Авторы, 2025. Издательство ООО «Балтийский медицинский образовательный центр». Данная статья распространяется на условиях «открытого доступа», в соответствии с лицензией CCBY-NC-SA 4.0 («Attribution-NonCommercial-ShareAlike» / «Атрибуция-Некоммерчески-Сохранение Условий» 4.0), которая разрешает неограниченное некоммерческое использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии указания автора и источника. Чтобы ознакомиться с полными условиями данной лицензии на русском языке, посетите сайт: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.ru>

Для цитирования: Ключев Е.А., Сухова М.Б., Растеряева М.В., Кухнина Л.С., Зинатуллин Р.Д., Гришин А.С., Остапюк М.В., Медяник И.А., Яшин К.С. Применение изображений, взвешенных по амидному протонному переносу, в стадировании диффузных глиом: проспективное исследование // *Лучевая диагностика и терапия*. 2025. Т. 16, № 3. С. 46–53, doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2025-16-3-46-53>.

USING OF AMIDE PROTON TRANSFER-WEIGHTED IMAGES IN THE STAGING OF DIFFUSE GLIOMAS: A PROSPECTIVE STUDY

¹Evgenii A. Kliuev^{*}, ^{1,2}Marina B. Sukhova[®], ¹Marina V. Rasteryaeva[®], ¹Liudmila S. Kukhnina[®],
¹Radik D. Zinatullin[®], ¹Artyom S. Grishin[®], ¹Michail V. Ostapiuk[®], ¹Igor A. Medianik[®], ¹Konstantin S. Yashin[®]
¹Privolzhsky Research Medical University, N. Novgorod, Russia
²Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, N. Novgorod, Russia

INTRODUCTION: Diffuse gliomas are the most common brain tumors. Gliomas of high malignancy are characterized by a poor prognosis and require complex combined treatment. Amide proton transfer is a modern technique that makes it possible to visualize metabolic changes in a tumor and increase the effectiveness of an MRI scan.

OBJECTIVE: to evaluate the possibilities of amide proton transfer in determining the degree of malignancy of diffuse cerebral gliomas.

MATERIALS AND METHODS: The study included 73 patients with histologically confirmed supratentorial adult type diffuse gliomas of the who underwent surgical treatment at the University clinic of PIMU from 2023 to 2025. The study was performed on a Philips Ingenia Elite X 3T magnetic resonance imaging machine (the Netherlands). The study protocol consisted of a standard protocol and amide proton transfer-weighted images (APT-WI). The average, minimum and maximum values of the relative concentration of mobile amide groups in the central and peripheral parts of the tumor, absolute and normalized by unchanged white matter, were calculated. The Mann-Whitney test was used to determine differences between patient groups.

RESULTS: The absolute values of the relative concentration of free amide groups in the central part of the tumor were higher in comparison with gliomas of low malignancy: average — 2.68 [2.07; 3.30] and 1.44 [1.34; 1.92], maximum — 2.96 [2.37; 3.81] and 1.62 [1.49; 2.11], minimum — 2.34 [1.62; 2.86] and 1.25 [1.14; 1.47], $p < 0.05$. Similar differences were also found in the perifocal area. — 1.58 [1.28; 1.90], 2.29 [1.85; 2.77], 0.95 [0.61; 1.16] — the average, maximum and minimum values, respectively, in diffuse gliomas of high malignancy and 1.02 [0.83; 1.11], 1.57 [1.21; 1.67], 0.61 [0.36; 0.79] in low-grade gliomas, $p < 0.05$. The normalized values differed only in the central part of the tumor: 3.25 [2.32; 4.86], 5.58 [3.50; 16.42] — the average and maximum values in tumors with a high degree of malignancy and 2.19 [1.68; 3.60], 3.10 [2.36; 12.19] in low grade tumors, respectively, $p < 0.05$. When comparing Grades 2.3 and 4 separately, a tendency was revealed to increase the values of the image signal weighted by amide proton transfer from Grade 2 to Grade 4, both in the central part of the tumor and in the peripheral.

DISCUSSIONS: Determining the degree of malignancy of a particular tumor in the preoperative period is one of the key tasks of radiology, as it allows for adequate treatment planning, improving living standards and increasing survival. The results of the study demonstrate the possibilities of amide proton transfer in the staging of glial tumors. The relative concentration of free amide groups, determined based on the signal intensity of APT-weighted images, increases accordingly to an increase in the degree of malignancy, which is probably due to a number of histological and metabolic differences in gliomas of different grades.

CONCLUSION: Statistically significant differences were found between the values of the relative concentration of free amide groups in the central and perifocal regions of glial tumors with different grades. The amide proton transfer method is informative in the study of patients with diffuse cerebral gliomas.

KEYWORDS: magnetic resonance imaging, amide proton transfer; neuroimaging; gliomas; degree of malignancy

^{*} For correspondence: Evgenii A. Kliuev, e-mail: eugenekliuev@yandex.ru

For citation: Kliuev E.A., Sukhova M.B., Rasteryaeva M.V., Kukhnina L.S., Zinatullin R.D., Grishin A.S., Ostapiuk M.V., Medianik I.A., Yashin K.S. Using of amide proton transfer-weighted images in the staging of diffuse gliomas: a prospective study // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2025. Vol. 16, No. 3. P. 46–53, <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2025-16-3-46-53>.

Введение. Амидный протонный перенос (АПП) является новой методикой магнитно-резонансной визуализации, которая основана на определении концентрации свободных амидных групп в ткани мозга. Метод позволяет получить информацию о тканевом метаболизме, что помогает различать степень злокачественности глиальных опухолей и клеточный состав. АПП основан на феномене

химического обмена-переноса спинного насыщения (CEST). Суть методики заключается в выявлении протонов, перемещающихся (обменивающихся) между амидными группами и водой. Добиться этого позволяет применение специального насыщающего радиочастотного импульса на резонансной частоте, специфичной для амидных групп — 3,5 м.д. (миллионных долей, ppm), что в результате дает повыше-

ние сигнала от протонов, участвующих в обмене между амидными группами и водой. С помощью АПП-взвешенных изображений возможно выявить области мозга, содержащие растворенный белок и количественно оценить их посредством определения концентрации амидных групп, обменивающихся протонами с растворителем [1].

В структуре злокачественных новообразований головного мозга и центральной нервной системы около 75% составляют глиальные опухоли, наиболее распространенной из которых является глиобластома [2]. Актуальность её своевременной диагностики обусловлена коротким периодом выживаемости и сложностью в подборе адекватного плана лечения. Амидный протонный перенос представляет собой перспективный метод диагностики, который позволяет стадировать опухоли глиального ряда [3], дифференцировать их от других гистологических источников [4, 5] и оценивать эффективность лечения [6, 7].

Тем не менее количество исследований, посвященных данной теме, остается недостаточным для формирования четкой картины и разработки критериев клинического применения.

Цель. Оценить возможности амидного протонного переноса в определении степени злокачественности диффузных глиом головного мозга.

Материалы и методы. Исследование было одобрено локальным Комитетом ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России по этике (протокол № 12 от 03.11.2023). Информированное согласие было получено от всех участников, включенных в исследование, или их законных представителей.

Пациенты

В исследование включено 73 пациента: 38 женщин в возрасте от 24 до 79 лет (средний 54 года), и 35 мужчин в возрасте от 20 до 80 лет (средний 49 лет) с гистологически подтвержденными супратенториальными диффузными глиомами взрослого типа, прошедших оперативное лечение в университетской клинике ПИМУ с 2023 по 2025 г. Распределение пациентов по степеням злокачественности представлено на рис. 1.

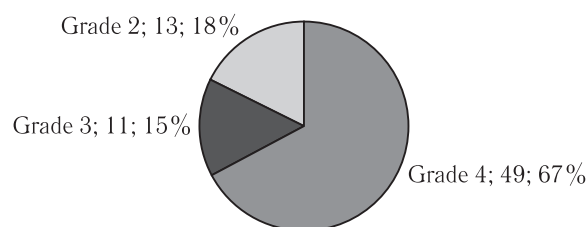


Рис. 1. Распределение пациентов с диффузными глиомами по степеням злокачественности

Fig. 1. The distribution of patients with diffuse gliomas by histological subtype and degrees of malignancy

МРТ-исследование

МРТ выполняли на томографе с индукцией магнитного поля 3 Т (Ingenia X, Philips Healthcare, Best, Нидерланды) с использованием 32-канальной

катушки для головы. Протокол включал стандартные последовательности (T2, T1 до и после контрастного усиления, T2-FLAIR, DWI) и изображения, взвешенные по переносу амидных групп (АПП-ВИ).

Использовались следующие параметры АПП-ВИ: 3D Turbo Spin Echo (TSE), время повторения (TR)=6306 мс; время эхо-сигнала (TE)=8,3 мс, угол поворота (FA)=90°, поле обзора=230×180 мм, размер вокселя сбора данных=1,8×1,8×6 мм, количество срезов=10, коэффициент параллельного ускорения (SENSE)=1,6, время сбора данных=3 минуты 53 секунды. Исследование с контрастным усилением проводили после внутривенной инъекции 0,1 мл/кг контрастного вещества на основе гадолиния (гадобутрол, 1 ммоль/мл).

В результате сбора данных были получены карты распределения относительной концентрации свободных амидных групп (КСА) для каждого пациента.

Количественный анализ полученных изображений проводился на рабочей станции Philips (IntelliSpace Portal V10 Philips Healthcare, Бест, Нидерланды). Пять круглых областей интереса (ОИ) ($\approx 0,2 \text{ см}^2$) были размещены в каждой области, определяемой при визуальном осмотре: солидный компонент опухоли, включающий область, накапливающую контрастный препарат или с самым низким значением ИКД (при отсутствии накопления); перифокальный отек-инфильтрация, определяемый как область повышенного уровня T2 на краю опухоли с более высоким коэффициентом диффузии (ИКД); контралатеральное неизменное белое вещество (КНБВ). Области интереса размещали, избегая кистозных, крупных некротических или геморрагических компонентов опухоли, выявленных на стандартных последовательностях. Размещение областей интереса выполнялось на скорректированных изображениях. Для дальнейшей статистической обработки отбирались следующие значения как для центральных отделов опухоли, так и для перифокальной области: среднее, максимальное, минимальное и относительное среднее значение, нормализованное по КНБВ.

Результаты. При проведении анализа числовых значений относительной концентрации свободных амидных групп были выявлены статистически значимые различия по критерию Манна–Уитни ($p < 0,05$) между пациентами с глиомами низкой (Grade 2, low grade) и высокой (Grade 3–4, high grade) степенями злокачественности по параметрам центральных отделов опухоли и перифокальной области при сравнении абсолютных значений. При сравнении нормализованных значений различались только средние и максимальные значения в центральной части опухоли (табл. 1). По всем перечисленным параметрам значения относительной концентрации свободных амидных групп были ниже у пациентов с глиомами низкой степени злокачественности, что отчетливо определяется на изображениях (рис. 2).

Таблица 1

Концентрация свободных амидных групп у пациентов с глиомами low grade и high grade

Table 1

Concentration of mobile amide groups in patients with low grade and high grade gliomas

Показатель КСА	Глиома low grade n=13 Me [Q1; Q3] ¹	Глиома high grade n=60 Me [Q1; Q3] ¹	p (U-критерий Манна–Уитни)
Солидный компонент			
КСА среднее	1,44 [1,34; 1,92]	2,68 [2,07; 3,30]	0,001
КСА среднее нормализованное	2,19 [1,68; 3,60]	3,25 [2,32; 4,86]	0,034
КСА минимальное значение	1,25 [1,14; 1,47]	2,34 [1,62; 2,86]	0,001
КСА минимальное значение нормализованное	2,73 [2,08; 4,29]	4,31 [3,14; 6,95]	0,062
КСА максимальное значение	1,62 [1,49; 2,11]	2,96 [2,37; 3,81]	0,001
КСА максимальное значение нормализованное	3,10 [2,36; 12,19]	5,58 [3,50; 16,42]	0,022
Перифокальная область			
КСА среднее	1,02 [0,83; 1,11]	1,58 [1,28; 1,90]	0,001
КСА среднее нормализованное	1,90 [1,19; 2,17]	2,16 [1,75; 3,33]	0,068
КСА минимальное значение	0,61 [0,36; 0,79]	0,95 [0,61; 1,16]	0,001
КСА минимальное значение нормализованное	1,02 [0,60; 1,59]	1,28 [1,02; 1,85]	0,17
КСА максимальное значение	1,57 [1,21; 1,67]	2,29 [1,85; 2,77]	0,001
КСА максимальное значение нормализованное	2,66 [1,83; 3,46]	3,08 [2,43; 4,93]	0,153

¹ Me [Q1; Q3], где Me — медиана, Q1 и Q3 — значения 25 и 75 перцентилей соответственно.
¹ Me [Q1; Q3], where Me is the median, Q1 and Q3 are the 25th and 75th percentile values, respectively.

Для глиом Grade 2 и Grade 3 были выявлены статистически значимые отличия абсолютных значений относительной концентрации свободных амидных групп в солидном компоненте: средние значения у Grade 2 1,44 [1,34; 1,92], у Grade 3 1,90 [1,73; 2,74], $p=0,03$, критерий Манна–Уитни; минимальные 1,25 [1,14; 1,47] и 1,65 [1,41; 2,41] $p=0,018$, критерий Манна–Уитни; максимальные 1,62 [1,49; 2,11] и 2,15 [1,93; 2,92] $p=0,018$, критерий Манна–Уитни и в перифокальной зоне — максимальные значения 1,55 [1,16; 1,66] и 1,89 [1,42; 2,12] $p=0,015$, критерий Манна–Уитни. Различий между нормализованными значениями выявлено не было.

При сравнении глиом 3-й и 4-й степеней злокачественности были выявлены различия между всеми абсолютными показателями, за исключением минимальных значений в периферической части опухоли. Среди нормализованных значений различались только максимальные в центральной части опухоли (табл. 2).

Обсуждение. Возможность неинвазивно предсказать степень злокачественности конкретной опухоли и её молекулярный подтип на дооперационном периоде является одной из ключевых задач современной нейрорадиологии и нейроонкологии [8, 9]. Это позволяет адекватно спланировать лечение, улучшить уровень жизни и увеличить выживаемость в группе пациентов с астроцитомами головного мозга.

Патогистологическое исследование является «золотым стандартом» определения степени злокачественности опухоли, но его информативность критически зависит от конкретной локализации изъятых образцов ткани внутри гетерогенной опухоли. Это особенно важно в случае отказа от открытого оперативного вмешательства в пользу стереотаксической

биопсии. Таким образом, правильно проведенное МР-исследование может не только предсказать вероятной морфологический тип опухоли, но и, что более важно, повысить информативность последующего патогистологического исследования.

В проведенном нами исследовании были изучены возможности методики амидного протонного переноса в определении степени злокачественности глиальных опухолей. Было обнаружено, что высокие значения относительной концентрации свободных амидных групп характерны для более злокачественных опухолей.

Полученные нами результаты согласуются с предыдущими исследованиями. Схожую зависимость распределения интенсивности сигнала на АПП-взвешенных изображениях от степени злокачественности глиальных опухолей продемонстрировали ученые из Японии — более высокий сигнал от солидного компонента глиобластомы по сравнению с олигодендроглиомой, но максимальные значения отмечались в области некроза [10]. Высокий сигнал от некротического компонента связан с большим количеством растворенного белка, возникшего из разрушенных клеток и, по большому счету, специфически не обуславливает высокий уровень злокачественности — тот же феномен наблюдается и в других полостях, заполненных высокобелковой жидкостью, как, например, кистозные компоненты менингиом и гематомы [1]. В связи с этим в нашем исследовании, как и в аналогичных, зоны некроза исключались из областей интереса.

Важной особенностью изображений, взвешенных по амидному протонному переносу, является возможность количественного анализа. Определение степени злокачественности во всех исследованиях базируется именно на численном выражении сигнала.

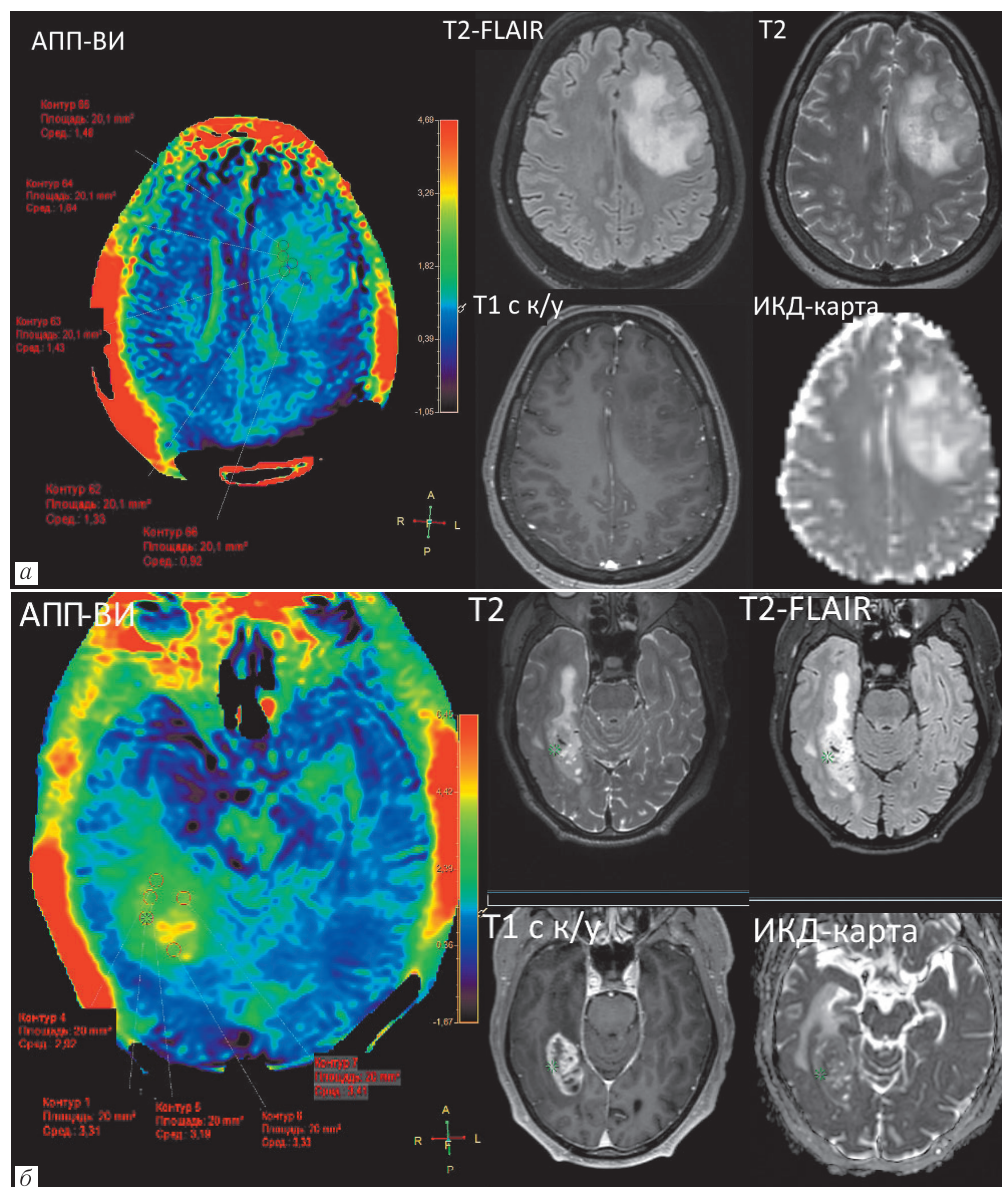


Рис. 2. МР-изображения головного мозга пациентов с глиомами. *а* — женщина, 55 лет. В левой лобной доле определяется объемное образование, неоднородно повышенного сигнала на T2 и T2-FLAIR, с неравномерным распределением измеряемого коэффициента диффузии (ИКД-карта), не накапливающее контрастный препарат (T1 с к/у). На изображениях, взвешенных по амидному протонному переносу (АПП-ВИ) отмечается слабое повышение сигнальных характеристик, по сравнению с окружающим белым веществом, среднее значение в центральной части опухоли 1,36%; минимальное — 0,92%; максимальное — 1,64%. Гистологическое заключение: Олигодендроглиома IDH-mutant, с коделецией 1p/19q. ICD-O code 9450/3, Grade II; *б* — мужчина, 80 лет. В правой височно-затылочной области определяется объемное образование, неоднородно повышенного сигнала на T2 и T2-FLAIR, с участками кистоподобной перестройки и отчетливым ограничением диффузии — снижением измеряемого коэффициента диффузии (ИКД-карта), неравномерно интенсивно накапливающее контрастный препарат (T1 с к/у). На изображениях, взвешенных по амидному протонному переносу (АПП-ВИ) отмечается выраженное неоднородное повышение сигнальных характеристик, по сравнению с окружающим белым веществом, среднее значение в центральной части опухоли 3,23%; минимальное — 2,92%; максимальное — 3,41%.

Гистологическое заключение: Глиобластома IDH-wild type, ICD-O code 9440/3, Grade IV

Fig. 2. MR images of the brain of patients with gliomas. *a* — female, 55 years old. There is a mass in the left frontal lobe, inhomogeneously hyperintense on T2 and T2-FLAIR, with an uneven distribution of the apparent diffusion coefficient (ADC map), no contrast enhancement is noted (T1 CE). The amide proton transfer weighted images (APT-WI) show a slight increase of signal compared to the surrounding white matter, the mean value in the central part of the tumor is 1.36%; the minimum is 0.92%; the maximum is 1.64%. Histopathology report: Oligodendroglioma IDH-mutant, with codelection 1p/19q. ICD-O code 9450/3, Grade II; *b* — male, 80 years old. In the right temporo-occipital region, there is a mass lesion, heterogeneously increased signal on T2 and T2-FLAIR, with necrotic areas and diffusion restriction — a decrease in the apparent diffusion coefficient (ADC map), with avid heterogeneous contrast enhancement (T1 CE). The amide proton transfer weighted images (APT-WI) show a pronounced heterogeneous increase of the signal compared to the surrounding white matter, the mean value in the central part of the tumor is 3.23%; the minimum value is 2.92%; the maximum is 3.41%. Histopathology report: Glioblastoma IDH-wild type, ICD-O code 9440/3, Grade IV

Таблица 2

Концентрация свободных амидных групп у пациентов с глиомами grade 3 и grade 4

Table 2

Concentration of mobile amide groups in patients with grade 3 and grade 4 gliomas

Показатель КСА	Глиома (grade 3) n=11 Me [Q1; Q3] ¹	Глиома (grade 4) n=49 Me [Q1; Q3] ¹	p (U-критерий Манна–Уитни)
Солидный компонент			
КСА среднее	1,90 [1,73; 2,74]	2,71 [2,23; 3,43]	0,003
КСА минимальное значение	1,65 [1,41; 2,41]	2,44 [1,86; 3,05]	0,023
КСА максимальное значение	2,15 [1,93; 2,92]	3,07 [2,62; 3,92]	0,001
КСА максимальное значение нормализованное	5,46 [3,60; 8,25]	7,15 [3,40; 24,42]	0,042
Перифокальная область			
КСА среднее	1,30 [0,87; 1,69]	1,67 [1,31; 2,04]	0,013
КСА максимальное значение	1,89 [1,42; 2,12]	2,41 [1,88; 2,80]	0,013

¹ Me [Q1; Q3], где Me — медиана, Q1 и Q3 — значения 25 и 75 перцентилей соответственно.
¹ Me [Q1; Q3], where Me is the median, Q1 and Q3 are the 25th and 75th percentile values, respectively.

Полученные в нашей работе значения относительной концентрации свободных амидных групп сравнимы с данными, представленными в мета-анализе Suh и соавт., посвященном различиям между глиомами низкой и высокой злокачественности [3], несмотря на общую их гетерогенность. Разнородность данных безусловно связана с применением разных протоколов и определяет необходимость стандартизации методики. Одним из вариантов такой стандартизации является введение относительных значений [11]. В нашем исследовании различия между относительными значениями были выявлены между опухолями низкой и высокой степени злокачественности, а также между опухолями 3-го и 4-го грейда. Достоверных различий между глиомами Grade 2 и Grade 3 выявлено не было. В предшествующих работах Togo [12] и Mostafa [13] также не было обнаружено различий между данными типами опухолей.

Важным наблюдением, полученным в проведенной работе, является то, что метод амидного протонного переноса позволяет выявить уровень злокачественности не только в ядре опухоли, но и в перифокальной зоне. Характеристики перифокальной области, в частности распространенность клеточной атипии, являются важным фактором при определении объема резекции и подборе лучевой и химиотерапии, для сни-

жения риска рецидива. Работы, посвященные изменению интенсивности сигнала АПП-ВИ в перифокальной зоне, немногочисленны и не дают в настоящее время четкого ответа касательно объема опухолевой инвазии. В частности, сравнивались характеристики накапливающих контраст компонентов и перифокальных изменений между глиобластомами и солитарными метастазами. Значения сигнала АПП-ВИ в не накапливающей контраст части опухолей обоих типов отличались от неизмененного белого вещества, но не имели значимых различий между собой [1]. Полученная в нашем исследовании закономерность между изменением значений относительной концентрации свободных амидных групп в зависимости от уровня злокачественности опухоли в перифокальной зоне требует дальнейшего изучения.

Заключение. Выявлены различия между значениями относительной концентрации свободных амидных групп в опухоли и перитуморальной зоне у диффузных глиом разной степени злокачественности. Включение амидного протонного переноса в протокол предоперационного исследования у пациентов с опухолями головного мозга значительно повышает его информативность, количественно и качественно характеризует гетерогенность опухоли и окружающей её зоны перифокальных изменений.

Сведения об авторах:

Клюев Евгений Александрович — врач-рентгенолог федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 603005, Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, д. 10/1; ORCID 0000–0003–2069–1710;

Сухова Марина Борисовна — доктор медицинских наук, заведующая кафедрой лучевой диагностики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 603005, Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, д. 10/1; профессор кафедры ядерной и экспериментальной медицины Института биологии и биомедицины федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского»; 603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23; ORCID 0000–0002–0504–1421;

Растеряева Марина Вячеславовна — кандидат медицинских наук, заведующая отделением рентгенологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 603005, Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, д. 10/1; ORCID 0000–0002–8462–3824;

Кухнина Людмила Сергеевна — ординатор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 603005, Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, д. 10/1; ORCID 0000–0002–4679–7196;

Зинатуллин Радик Дамирович — студент федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 603005, Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, д. 10/1; e-mail: radik.drneurosurgeon@yandex.ru; ORCID 0009–0005–2393–8004;

Гришин Артем Сергеевич — кандидат медицинских наук, ассистент кафедры патологической анатомии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 603005, Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, д. 10/1; ORCID 0000–0001–7885–8662;

Остапюк Михаил Владимирович — врач-нейрохирург федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 603005, Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, д. 10/1; ORCID 0000–0002–0418–5597;

Медяник Игорь Александрович — доктор медицинских наук, врач-нейрохирург федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 603005, Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, д. 10/1; ORCID 0000–0002–7519–0959;

Яшин Константин Сергеевич — кандидат медицинских наук, врач-нейрохирург федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 603005, Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, д. 10/1; ORCID 0000–0002–5723–7389.

Information about the authors:

Evgenii A. Kliuev — radiologist, FSBEI HE «Privolzhsky Research Medical University» MOH Russia, 10/1 Minin and Pozharsky square, Nizhny Novgorod, 603005; ORCID 0000–0003–2069–1710;

Marina B. Sukhova — Head of the Department of Radiology of FSBEI HE «Privolzhsky Research Medical University» MOH Russia, 10/1 Minin and Pozharsky square, Nizhny Novgorod; Professor of the Department of Nuclear and Experimental Medicine at the Institute of Biology and Biomedicine the Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 23 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603022; ORCID 0000–0002–0504–1421;

Marina V. Rasteryaeva — Cand. of Sci. (Med.), Head of the Department of Radiology FSBEI HE «Privolzhsky Research Medical University» MOH Russia, 10/1 Minin and Pozharsky square, Nizhny Novgorod; ORCID 0000–0002–8462–3824;

Liudmila S. Kukhnina — resident, FSBEI HE «Privolzhsky Research Medical University» MOH Russia, 10/1 Minin and Pozharsky square, Nizhny Novgorod. [https://orcid.org/0000–0002–4679–7196](https://orcid.org/0000-0002-4679-7196);

Radik D. Zinatullin — student, FSBEI HE «Privolzhsky Research Medical University» MOH Russia, 10/1 Minin and Pozharsky square, Nizhny Novgorod; ORCID 0009–0005–2393–8004 radik.drneurosurgeon@yandex.ru;

Artyom S. Grishin — Cand. of Sci. (Med.), Assistant of the Department of Pathological Anatomy FSBEI HE «Privolzhsky Research Medical University» MOH Russia, 10/1 Minin and Pozharsky square, Nizhny Novgorod; ORCID 0000–0001–7885–8662;

Michail V. Ostapiuk — neurosurgeon FSBEI HE «Privolzhsky Research Medical University» MOH Russia, 10/1 Minin and Pozharsky square, Nizhny Novgorod; ORCID 0000–0002–0418–5597;

Igor A. Medyanik — Dr. of Sci. (Med.), neurosurgeon FSBEI HE «Privolzhsky Research Medical University» MOH Russia, 10/1 Minin and Pozharsky square, Nizhny Novgorod; ORCID 0000–0002–7519–0959;

Konstantin S. Yashin — Cand. of Sci. (Med.), neurosurgeon FSBEI HE «Privolzhsky Research Medical University» MOH Russia, 10/1 Minin and Pozharsky square, Nizhny Novgorod; ORCID 0000–0002–5723–7389.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределен следующим образом: концепция и план исследования — *Е.А.Клюев, М.Б.Сухова, К.С.Яшин, И.А.Медяник*; сбор и анализ данных — *Е.А.Клюев, М.В.Растеряева, Л.С.Кухнина, Р.Д.Зинатуллин, М.В.Остапюк, А.С.Гришин, К.С.Яшин, И.А.Медяник*; подготовка рукописи — *Е.А.Клюев, М.Б.Сухова, К.С.Яшин*.

Authors' contributions. All authors confirm their authorship according to the international ICMJE criteria (all authors made substantial contributions to the conception, research, and preparation of the article, and read and approved the final version before publication). Special contribution — *EAK, MBS, KSY, IAM*; aided in the concept and plan of the study — *EAK, MVR, LSK, RDZ, MVO, GKS, KSY, IAM*; preparation of the manuscript — *EAK, MBS, KSY*.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure: the authors declare that they have no competing interests.

Соответствие принципам этики: исследование было одобрено локальным Комитетом ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России по этике (протокол № 12 от 03.11.2023). Информированное согласие было получено от всех участников, включенных в исследование, или их законных представителей.

Adherence to ethical standards: the study was approved by the local Ethics Committee of the FSBEI HE PRMU MOH Russia (Protocol No. 12 dated 03.11.2023). Informed consent was obtained from all participants included in the study or their legal representative.

Поступила/Received: 21.06.2025

Принята к печати/Accepted: 29.08.2025

Опубликована/Published: 29.09.2025

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Kamimura K., Nakajo M., Yoneyama T. et al. Amide proton transfer imaging of tumors: theory, clinical applications, pitfalls, and future directions // *Jpn. J. Radiol.* Vol. 37, No. 2. P. 109–116. Feb. 2019. doi: 10.1007/s11604-018-0787-3.
2. Miller K.D., Ostrom Q.T., Kruchko C. et al. Brain and other central nervous system tumor statistics, 2021 // *CA. Cancer J. Clin.* 2021. Vol. 71, No. 5. P. 381–406. doi: 10.3322/caac.21693.
3. Suh C.H., Park J.E., Jung S.C. et al. Amide proton transfer-weighted MRI in distinguishing high- and low-grade gliomas: a systematic review and meta-analysis // *Neuroradiology*. 2019. Vol. 61, No. 5. P. 525–534. doi: 10.1007/s00234-018-02152-2.
4. Jiang S., Yu H., Wang X. et al. Molecular MRI differentiation between primary central nervous system lymphomas and high-grade gliomas using endogenous protein-based amide proton transfer MR imaging at 3 Tesla // *Eur. Radiol.* Vol. 26, No. 1. P. 64–71, Jan. 2016, doi: 10.1007/s00330-015-3805-1.
5. Zhang H.-W., Liu X.-L., Zhang H.-B. et al. Differentiation of Meningiomas and Gliomas by Amide Proton Transfer Imaging: A Preliminary Study of Brain Tumour Infiltration // *Front. Oncol.* 2022. Vol. 12. P. 886968. doi: 10.3389/fonc.2022.886968.
6. Onishi R., Sawaya R., Tsuji K. et al. Evaluation of Temozolomide Treatment for Glioblastoma Using Amide Proton Transfer Imaging and Diffusion MRI // *Cancers*. 2022. 1907. Vol. 14, No. 8. P. 1907. doi: 10.3390/cancers14081907.
7. Ma B., Blakeley J.O., Hong X. et al. Applying amide proton transfer-weighted MRI to distinguish pseudop and regression from true progression in malignant gliomas // *J. Magn. Reson. Imaging*. 2016. Vol. 44, No. 2. P. 456–462. doi: 10.1002/jmri.25159.
8. Du N., Zhou X., Mao R. et al. Preoperative and Noninvasive Prediction of Gliomas Histopathological Grades IDH Molecular Types Using Multiple MRI Characteristics // *Front. Oncol.* 2022. Vol. 12. P. 873839. doi: 10.3389/fonc.2022.873839.
9. Hirschler L., Sollmann N., Schmitz-Abecassis B. et al. Advanced MR Techniques for Preoperative Glioma Characterization: Part 1 // *J. Magn. Reson. Imaging*. 2023. Vol. 57, No. 6. P. 1655–1675. doi: 10.1002/jmri.28662.
10. Koike H., Morikawa M., Ishimaru H. et al. Amide Proton Transfer–Chemical Exchange Saturation Transfer Imaging of Intracranial Brain Tumors and Tumor-Like Lesions: Our Experience and a Review // *Diagnostics*. 2023. Vol. 13, No. 5. P. 914. doi: 10.3390/diagnostics13050914.
11. Hou H., Chen W., Diao Y. et al. 3D Amide Proton Transfer-Weighted Imaging for Grading Glioma and Correlating IDH Mutation Status: Added Value to 3D Pseudocontinuous Arterial Spin Labelling Perfusion // *Mol. Imaging Biol.* 2023. Vol. 25, No. 2. P. 343–352. doi: 10.1007/s11307-022-01762-w.
12. Togao O., Yoshiura T., Keupp J. et al. Amide proton transfer imaging of adult diffuse gliomas: correlation with histopathological grades // *Neuro-Oncol.* 2014. Vol. 16, No. 3. P. 441–448. doi: 10.1093/neuonc/not158.
13. Mostafa M.A., Abo-Elhoda P.M., Abdelrahman A.S. et al. The added value of relative amide proton transfer (rAPT) to advanced multiparametric MR imaging for brain glioma characterization // *Egypt. J. Radiol. Nucl. Med.* 2023. Vol. 54, No. 1. P. 182. doi: 10.1186/s43055-023-01104-y.

Уважаемые коллеги!



Библиотека журнала «Лучевая диагностика и терапия» пополнилась руководством для врачей, которое предназначено для подготовки врачей — лучевых диагностов и врачей-клиницистов по вопросам современных подходов к получению и анализу лучевых изображений, в соответствии с критериями, принятыми в международной клинической практике, а также требованиями, предъявляемыми к формированию структурированных отчетов. Такой подход обеспечивает повышение качества выполняемых исследований, интерпретации изображений и достоверности заключений, а также способствует улучшению междисциплинарной коммуникации.

Настоящее издание является логическим продолжением руководств для врачей «Современные стандарты анализа лучевых изображений» (2017), «Современные классификации RADS и принципы построения заключения» (2018), «Современные стандарты анализа лучевых изображений и принципы построения заключения» (2019), «Современные стандарты анализа лучевых изображений и алгоритмы построения заключения» (2020–2024).

При его подготовке были использованы материалы, обсуждавшиеся на одноименной Международной ежегодной телеконференции 15 декабря 2024 г. (Санкт-Петербург).

Руководство для врачей «Современные стандарты анализа лучевых изображений и принципы построения заключения. Том IX» может использоваться для подготовки в системе последипломного и дополнительного профессионального образования, а также в системе ОМС и ДМС для контроля качества оказываемой медицинской помощи.

Приобрести книгу можно

по тел.: +7 (812) 956-92-55 и на сайте издательства <https://www.bmoc-spb.ru>.