



ПРОТОННАЯ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ (¹H-MAGNETIC RESONANCE SPECTROSCOPY) В ОЦЕНКЕ МЕТАБОЛИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПЕРИФОКАЛЬНОЙ ЗОНЫ ПРИ ГЛИОМАХ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ЗЛОКАЧЕСТВЕННОСТИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

А.С. Сидорина¹, Н.В. Просалова², Д.Д. Дорохова¹, М.Ю. Прокудин³, Б.В. Мартынов³,
А.В. Рыжков¹, Г.Е. Труфанов¹

¹Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова, ул. Аккуратова, д. 2, г. Санкт-Петербург, 197341, Россия

²Санкт-Петербургский клинический научно-практический центр специализированных видов медицинской помощи (онкологический) имени Н.П. Напалкова, Ленинградская ул., д. 68А, пос. Песочный, Санкт-Петербург, 197758, Россия

³Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова, ул. Академика Лебедева, д. 6, Санкт-Петербург, 194044, Россия

Резюме. *Актуальность.* Глиомы высокой степени злокачественности характеризуются инфильтративным ростом с возможным наличием опухолевых клеток в перифокальной зоне, что создаёт трудности в определении истинных границ опухоли при использовании стандартных методов МРТ-диагностики. *Цель исследования:* представить обзор современных публикаций о применении протонной магнитно-резонансной спектроскопии (¹H-MRS) в оценке метаболических изменений перифокальной зоны при глиомах высокой степени злокачественности. *Материалы и методы.* Проведен систематический анализ публикаций в базах данных PubMed, Scopus, eLibrary и Google Scholar за период 2015–2024 гг. с использованием ключевых слов: "¹H-MRS", "high-grade glioma", "glioblastoma", "peritumoral zone", "metabolic changes". *Результаты.* Протонная МР-спектроскопия позволяет выявлять метаболические нарушения в перифокальной зоне глиом, включая повышение уровня холина (Cho), снижение N-ацетиласпартата (NAA) и появление лактата (Lac). Наиболее значимыми прогностическими маркерами являются повышенные соотношения Cho/NAA >1,99 и Cho/Cr >1,73, которые коррелируют с ранним рецидивом опухоли и наличием инфильтрирующих опухолевых клеток в зонах, не усиливающих контраст. *Заключение.* Интеграция ¹H-MRS в клинический протокол оценки глиом высокой степени злокачественности повышает точность диагностики, улучшает планирование хирургического вмешательства и лучевой терапии, а также позволяет оптимизировать персонализированные подходы к лечению пациентов.

Ключевые слова: глиомы высокой степени злокачественности [D018303]; протонная МР-спектроскопия [D009682]; метаболические маркеры [D015415]; перифокальная зона [нет точного MeSH-кода]; глиобластома [D005909]; холин [D002794]; N-ацетиласпартат [D019807]; креатин [D003401]; лактат [D019344].

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование проводилось без спонсорской поддержки.

Для цитирования: Сидорина А.С., Просалова Н.В., Дорохова Д.Д., Прокудин М.Ю., Мартынов Б.В., Рыжков А.В., Труфанов Г.Е. Протонная магнитно-резонансная спектроскопия (¹H-magnetic resonance spectroscopy) в оценке метаболических изменений перифокальной зоны при глиомах высокой степени злокачественности (обзор литературы). *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ»: Реабилитация, Врач и Здоровье.* 2025;15(4):255–263. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2025.4.MIM.3>



PROTON MAGNETIC RESONANCE SPECTROSCOPY (¹H-MAGNETIC RESONANCE SPECTROSCOPY) IN ASSESSING METABOLIC CHANGES IN THE PERIFOCAL ZONE IN HIGH-GRADE GLIOMAS (LITERATURE REVIEW)

Anastasiya S. Sidorina¹, Nataliya V. Prosalova², Daria D. Dorokhova¹, Mikhail .Yu. Prokudin³, Boris V. Martynov³, Anton V. Ryzhkov¹, Gennadiy E. Trufanov¹

¹Almazov National Research Medical Center, Akkuratova St., 2. St. Petersburg, 197341, Russia

²St. Petersburg Clinical Scientific and Practical Center of specialized types of medical care (oncological) named after N.P. Napalkov, Leningradskaya St., 68A, village Pesochny, St. Petersburg, 197758, Russia

³S.M. Kirov Military Medical Academy, Academician Lebedev St., 6, lit. Zh, St. Petersburg, 194044, Russia

Abstract. *Background.* High-grade gliomas are characterized by infiltrative growth with possible presence of tumor cells in the perifocal zone, which creates difficulties in determining the true tumor boundaries when using standard MRI diagnostic methods. *Objective:* To present a review of current publications on the application of proton magnetic resonance spectroscopy (¹H-MRS) in assessing metabolic changes in the perifocal zone in high-grade gliomas. *Materials and methods.* A systematic analysis of publications in PubMed, Scopus, eLibrary and Google Scholar databases for the period 2015-2024 was conducted using keywords: "¹H-MRS", "high-grade glioma", "glioblastoma", "peritumoral zone", "metabolic changes". *Results.* Proton MR spectroscopy allows detection of metabolic disorders in the perifocal zone of gliomas, including increased choline (Cho) levels, decreased N-acetylaspartate (NAA) and appearance of lactate (Lac). The most significant prognostic markers are elevated Cho/NAA ratios >1.99 and Cho/Cr ratios >1.73, which correlate with early tumor recurrence and presence of infiltrating tumor cells in non-contrast enhancing zones. *Conclusion.* Integration of ¹H-MRS into the clinical protocol for evaluating high-grade gliomas improves diagnostic accuracy, enhances surgical and radiation therapy planning, and allows optimization of personalized treatment approaches for patients

Keywords: high-grade gliomas [D018303]; proton MR spectroscopy [D009682]; metabolic markers [D015415]; perifocal zone [нет точного MeSH-кода]; glioblastoma [D005909]; choline [D002794]; N-acetylaspartate [D019807]; creatine [D003401]; lactate [D019344].

Competing interests. The authors declare no competing interests.

Funding. This research received no external funding.

Cite as: Sidorina A.S., Prosalova N.V., Dorokhova D.D., Prokudin M.Yu., Martynov B.V., Ryzhkov A.V., Trufanov G.E. Proton magnetic resonance spectroscopy (¹H-magnetic resonance spectroscopy) in assessing metabolic changes in the perifocal zone in high-grade gliomas (literature review). *Bulletin of the Medical Institute "REAVIZ": Rehabilitation, Doctor and Health.* 2025;15(4):255-263. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2025.4.MIM.3>

Введение

Глиомы – наиболее распространённые первичные опухоли центральной нервной системы (ЦНС), характеризующиеся инфильтративным ростом и гетерогенностью биологических свойств [1]. Одной из ключевых проблем диагностики глиом остаётся определение истинных границ опухолевого поражения, особенно в так называемой перифокальной зоне – области мозга, прилегающей к видимому при магнитно-резонансной томографии (МРТ) участку опухоли, где возможно наличие инфильтрированных клеток, не выявляемых при применении традиционных импульсных последовательностей (ИП), в том числе с контрастным усилением [2]. Уровень смертности при глиомах высокой степени злокачественности остаётся высоким несмотря на применение комплексной терапии, средняя продолжительность жизни пациентов редко превышает 12-15 месяцев [3], а пятилетняя выживаемость остаётся ниже 5%.

Современные представления о патогенезе глиом подчёркивают значимость перифокальной зоны, окружающей макроскопически определяемую опухоль, которая может быть визуализирована как зона гиперинтенсивности на T2/FLAIR-ИП. Эта зона часто содержит инфильтрирующие опухолевые клетки, несмотря на видимое отсутствие морфологических изменений [4].

Гистологическая картина перифокальной зоны при глиомах высокой степени злокачественности характеризуется выраженными воспалительными реакциями, включая периваскулярную инфильтрацию лимфоцитами и плазматическими клетками, а также активной пролиферацией астроцитов и микроглии. Кроме того, в перифокальной области наблюдаются признаки деструкции нейронов и аксонов, что свидетельствует о нарушении нейрональной проводимости и функциональной активности окружающих тканей [5].

Согласно новой классификации опухолей ЦНС, представленной ВОЗ в 2021 году, диагностические критерии основываются не только на гистологической картине, но и на молекулярно-генетических характеристиках. В соответствии с данной классификацией, диффузные глиомы у взрослых подразделяются на три основных типа [6]:

1. Астроцитома, IDH-мутантная – характеризуется мутацией в гене IDH1/2 и отсутствием коделеции 1p/19q. Прогноз умеренный, склонна к малигнизации.

2. Олигодендроглиома, IDH-мутантная с коделецией 1p/19q – медленно прогрессирующая опухоль с относительно благоприятным прогнозом и хорошим ответом на терапию.

3. Глиобластома, IDH-дикий тип – наиболее агрессивная форма глиом, быстро прогрессирует, часто

сопровождается амплификацией гена EGFR, мутацией TERT и потерей гетерозиготности по 10q [1].

Такой подход позволяет более точно стратифицировать опухоли и прогнозировать их поведение.

В настоящее время стандартом диагностического обследования пациентов со злокачественными опухолями ЦНС, по мнению большинства учёных, является МРТ головного мозга в режимах T1 без и с контрастированием, T2-ВИ и FLAIR-последовательности [7]. Однако традиционные методы нейровизуализации, включая МРТ с контрастным усилением, часто оказываются недостаточно чувствительными для точного определения границ опухолевой инфильтрации, особенно в перифокальной зоне [2].

Протонная магнитно-резонансная спектроскопия (¹H-MPC) представляет собой уникальную неинвазивную методику, применение которой позволяет оценивать биохимический состав тканей in vivo [8, 9]. В отличие от стандартной МРТ, визуализирующей структурные изменения, ¹H-MPC выявляет метаболические нарушения, такие как повышение уровня холина (Cho), снижение N-ацетиласпартата (NAA) и появление лактата (Lac), что имеет важное значение для дифференциальной диагностики, оценки степени злокачественности и планирования дальнейшего лечения [9].

Особый интерес представляет применение ¹H-MPC для изучения перифокальной зоны, окружающей контрастируемую часть опухоли, где традиционные методы визуализации часто оказываются недостаточно информативными [8]. Анализ метаболических изменений в этой зоне может помочь в определении более точных границ опухолевой инфильтрации, прогнозировать течение заболевания и в оценке эффективности терапии.

Цель исследования: представить обзор современных публикаций о применении протонной магнитно-резонансной спектроскопии (¹H-MRS) в оценке метаболических изменений перифокальной зоны при глиомах высокой степени злокачественности.

Материалы и методы

Для подготовки данного обзора был проведён систематический анализ публикаций по теме применения протонной магнитно-резонансной спектроскопии при глиомах высокой степени злокачественности с акцентом на метаболические изменения в перифокальной зоне.

Поиск источников проводился в базах данных PubMed, Scopus, eLibrary и GoogleScholar за период 2015-2024 гг. с использованием ключевых слов: "¹H-MRS", "high-gradeglioma", "glioblastoma", "peritumoralzone", "metabolicchanges".

В обзор включались оригинальные исследования, клинические наблюдения, систематические обзоры и мета-анализы, соответствующие теме и критериям научной достоверности.

Дополнительно были проанализированы отчетственные источники, в том числе материалы конференций и рекомендации профильных сообществ, отражающие состояние вопроса в российской клинической практике. Предпочтение отдавалось публикациям, содержащим количественные данные о концентрациях метаболитов (Cho, NAA, Cr, Lac, Lip) в перифокальной зоне, а также визуализации на MRS-картах (Cho/NAA, Cho/Cr).

Результаты

1. Принцип ¹H-MRS

Протонная магнитно-резонансная спектроскопия (¹H-MRS) – это неинвазивная МР-методика, позволяющая определять концентрации метаболитов в живой ткани, преимущественно в головном мозге. Метод основан на регистрации резонансных частот протонов водорода (¹H), находящихся в различных химических окружениях. Эти частоты смещаются в зависимости от экранирования ядер электронами и выражаются в единицах частей на миллион (ppm) – так называемый химический сдвиг [10].

После возбуждения ткани радиочастотным импульсом регистрируется сигнал свободной индукции (FID), который преобразуется в спектр с помощью быстрого Фурье-преобразования (FFT). Каждый метаболит даёт характерный пик в определённой области ppm, что позволяет его идентифицировать и количественно оценить [11] (табл. 1).

Эти соединения можно обнаруживать в пределах вокселя, выбранного в зоне интереса (например, перифокальной зоне опухоли), что позволяет выявлять биохимические изменения, даже когда морфологически ткань выглядит неизменной [11].

Таблица 1. Ключевые метаболиты и их диагностическое значение при ¹H-MRS
Table 1. Key metabolites and their diagnostic significance in ¹H-MRS

Метаболит	ppm	Клиническое значение
Choline (Cho)	~3.2	Мембранный метаболизм, опухолевая пролиферация
N-acetylaspartate (NAA)	~2.0	Нейрональная целостность
Creatine (Cr)	~3.0	Энергетический обмен, референсный стандарт
Lactate (Lac)	~1.3	Анаэробный метаболизм, гипоксия, некроз
Lipids (Lip)	~0.9-1.3	Продукты клеточного распада
Glx (Glu + Gln)	~2.1-2.5	Глутамат и глутамин – нейротрансмиттеры

Визуально спектр представляет собой график, на котором по оси X откладывается химический сдвиг (в ppm), а по оси Y – амплитуда сигнала (пропорциональная концентрации метаболита) (рис. 1).

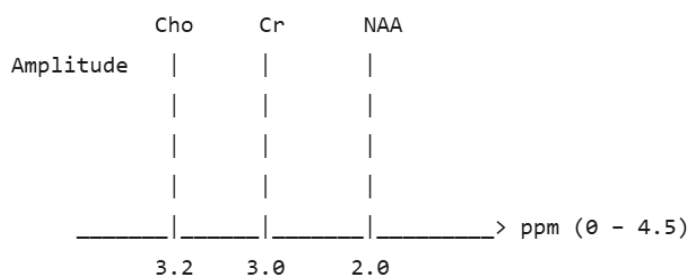


Рисунок 1. На МР-спектре пики располагаются слева направо, начиная с высоких ppm. Например, пик холина (~3.2 ppm) будет находиться левее, чем пик NAA (~2.0 ppm). На графике видно три основных пика: холин (Cho, ~3.2 ppm), креатин (Cr, ~3.0 ppm) и N-ацетиласпартат (NAA, ~2.0 ppm)

Figure 1. On the PMR spectrum, the peaks are located from left to right, starting from high ppm. For example, the peak of choline (~3.2 ppm) will be to the left than the peak of NAA (~2.0 ppm). The graph shows three main peaks: choline (Cho, ~3.2 ppm), creatine (Cr, ~3.0 ppm) and N-acetylaspartate (NAA, ~2.0 ppm)

В протонной магнитно-резонансной спектроскопии (^1H -MRS) для локализации сигнала используются две наиболее распространённые импульсные последовательности: PRESS (PointRESolved-Spectroscopy) и STEAM (STimulatedEchoAcquisition Mode). Обе методики применяются в клинической практике, каждая имеет свои особенности.

PRESS – стандартная и наиболее часто используемая последовательность, обеспечивающая более высокий сигнал (SNR) при умеренном времени сканирования. PRESS основана на двух последовательных 180° радиочастотных импульсах, что позволяет добиться высокой чувствительности и лучшего подавления фонового сигнала, особенно при длинных TE (рис. 2).

STEAM, напротив, использует комбинацию трёх 90° импульсов и позволяет достигать более короткого времени эхо (TE), что полезно для детектирования метаболитов с коротким временем релаксации T2 (например, глутамата или миоинозитола). Однако STEAM уступает PRESS по соотношению сигнал/шум – сигнал может быть до 50% ниже [14].

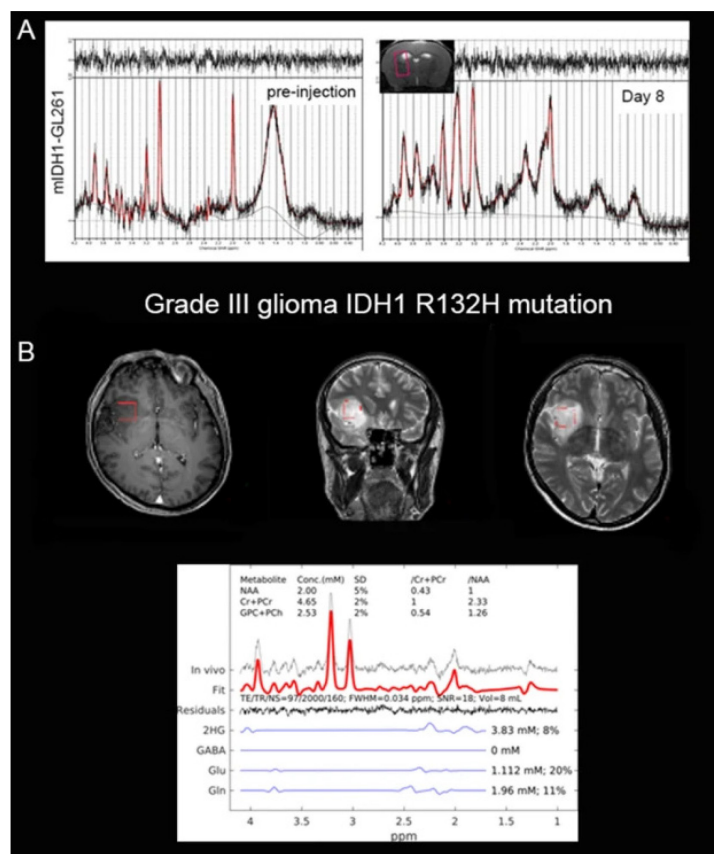


Рисунок 2. Обнаружение 2-гидроксиглутарата (2HG) с помощью МР-спектроскопии головного мозга in vivo (специальная одновоксельная последовательность PRESS TE=97 мс): **A7** Тесла МР-спектроскопия: в ксенотрансплантате (глиома с мутацией IDH1) пик 2HG (2,25 ppm) отсутствует в здоровом мозге (слева) и обнаруживается при росте глиомы (справа) [12]; **B3** Тесла МР-спектроскопия: 2HG можно измерить у пациента с глиомой и мутацией IDH1 [13]

Figure 2. Detection of 2-hydroxyglutarate (2HG) using in vivo brain MR spectroscopy (special single-pixel sequence PRESS TE=97 ms): **A7** Tesla MR spectroscopy: in a xenograft (glioma with IDH1 mutation), the 2HG peak (2.25 ppm) is absent in a healthy brain (left) and is detected with the growth of glioma (on the right) [12]; **B3** Tesla MR spectroscopy: 2HG can be measured in a patient with glioma and an IDH1 mutation [13]

Выбор между STEAM и PRESS зависит от задач исследования:

- PRESS предпочтительнее при работе с метаболитами, устойчивыми к J-связыванию и при оценке глиозных изменений, где важен высокий SNR.

STEAM используется, если необходимо минимизировать J-модуляцию или применять очень короткие TE для захвата слабых и быстро исчезающих сигналов [15]. Существует два основных подхода к проведению протонной МР-спектроскопии: одновоксельная (SVS) и многовоксельная (MRSI/CSI). При одновоксельной спектроскопии сигнал собирается из одного вокселя объёмом 1–8 см³, что обеспечивает высокое отношение сигнал/шум и делает метод особенно подходящим для точечной оценки подозрительных участков. В свою очередь, многовоксельная спектроскопия позволяет одновременно анализировать матрицу вокселей (например, 8×8), создавая метаболические карты (например, Cho-map или Cho/NAA-map), что значительно расширяет возможности пространственного анализа.

Метод оптимален для оценки гетерогенности опухоли, выявления инфильтрации в перифокальной зоне, а также для планирования объёма резекции и зоны облучения. Особенно при глиомах высокой степени злокачественности, MRSI помогает различать опухолевый рецидив и постлучевые изменения, тем самым повышая точность нейроонкологической диагностики [10].

2. Применение ¹H-MRS при глиомах высокой степени на примере глиобластомы

Глиобластома – это высокоагрессивная и инвазивная опухоль, поражающая ЦНС [16]. Она характеризуется выраженным метаболическим переустройством, которое чётко визуализируется при помощи протонной МР-спектроскопии (¹H-MRS). Эти изменения затрагивают как основную массу опухоли, так и перифокальную зону, что имеет решающее значение для диагностики, планирования лечения и оценки рецидива.

Yong Cui и соавт. (2020) показали, что при глиобластомах ¹H-MRS позволяет обнаружить повышенные значения Cho и сниженные NAA в зоне вне контрастного усиления, что коррелирует с инфильтрацией опухолевыми клетками (рис. 3). Авторы отметили, что более высокое соотношение Cho/NAA в послеоперационном периоде в перифокальной зоне указывает на рецидив опухоли, а его прогностическое значение было дополнительно подтверждено при многофакторном анализе. Теоретически, увеличение соотношения Cho/NAA отражает более выраженное разрушение нейро-

нов и высокую метаболическую активность опухолевых клеток [8]. Это объясняет, почему в послеоперационной перифокальной зоне регистрируются более высокие значения Cho/NAA, ассоциированные с неблагоприятным прогнозом.

Cordova J.S. и соавт. (2019), продемонстрировали, что индекс Cho/NAA способен выявлять не только зоны с риском рецидива, сопровождающегося контрастным усилением, но также коррелирует с продолжительностью безрецидивного периода у пациентов с глиобластомой (ГБМ) [17].

В исследовании Tarnawski R. и соавт. [18], включавшем 51 пациента с злокачественными глиомами, была проведена МР-спектроскопия послеоперационного очага. Авторы зафиксировали значительное повышение соотношений Cho/Cr, Cho/NAA и миоинозитол/Cr, а также снижение NAA/Cr в перифокальной зоне, что указывает на сохраняющуюся метаболическую активность. Кроме того, они отметили, что Lac/NAA > 2 служит независимым прогностическим фактором риска.

Tolia M. и соавт. (2015) оценивали прогностическую значимость MRS в раннем послеоперационном периоде у пациентов с глиомами высокой степени и пришли к выводу, что Cho/Cr ≥ 2 ассоциируется с более ранним развитием рецидива [19].

Кроме того, работы Zhang и соавт. (2018) и Gadji и соавт. (2019) также отмечали, что повышение Cho/Cr и появление Lac в зонах, не усиливающихся контрастом, коррелируют с опухолевыми клетками при гистологической верификации [20, 21].

Lu W. и соавт. (2024) в своем исследовании показали, что повышенные значения Cho/NAA > 1.99 (HR=20.832) и Cho/Cr > 1.73 (HR=4.977) в неконтрастирующейся перифокальной зоне глиобластомы, выявленные методом предоперационной многовоксельной ¹H-MRS, являются независимыми предикторами раннего рецидива. Авторы подтвердили это путём ко-регистрации предоперационных и послерецидивных МРТ, выделив зоны будущего рецидива с характерным метаболическим профилем: значимым повышением Cho/NAA/Cr и снижением NAA/Cr по сравнению с зонами без рецидива [22].

Эти исследования подтверждают, что перифокальная зона может содержать остаточные опухолевые клетки, а применение ¹H-MRS позволяет получить важные сведения о метаболизме опухоли, способствуя более точному наблюдению и индивидуализации терапии.

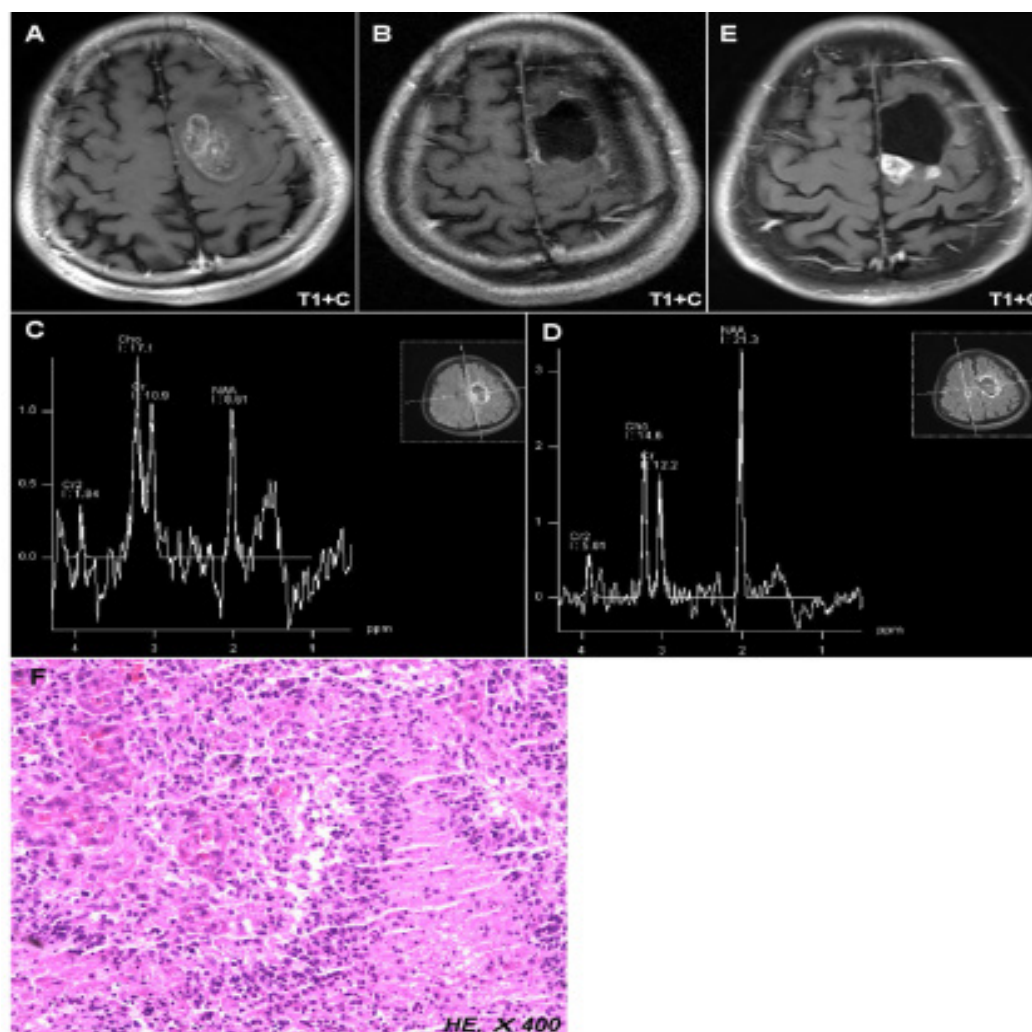


Рисунок 3. Клинический случай из исследования [8]: **A.** Предоперационные МРТ-изображения демонстрируют патологический очаг в левой прецентральной извилине и дополнительной моторной зоне. **B.** Послеоперационные МРТ-изображения подтверждают удаление опухоли. **C, D.** При этом в перифокальной зоне регистрируется повышенное соотношение Cho/NAA (>1.31) по сравнению с контралатеральной областью. **E.** Через 12 месяцев после операции в перифокальной зоне визуализируется новое контрастируемое образование. **F.** Рецидив опухоли верифицирован гистологически при биопсии

Figure 3. Clinical case from the study [8]: **A.** Preoperative MRI images show a pathological focus in the left precentral gyrus and an additional motor area. **B.** Postoperative MRI images confirm the removal of the tumor. **C, D.** At the same time, an increased Ho/NAA ratio (>1.31) is recorded in the perifocal area compared with the contralateral area. **E.** 12 months after surgery, a new contrasting formation is visualized in the perifocal area. **F.** Tumor recurrence was verified histologically by biopsy

Протонная магнитно-резонансная спектроскопия (^1H -MRS) представляет собой важный клинический инструмент в нейроонкологии, особенно при глиомах высокой степени злокачественности. Она может применяться при планировании резекции для выявления метаболически активных зон за пределами контрастного усиления, что, в свою очередь, может позволить более точно определить объём инфильтрации и минимизировать остаточную опухолевую массу [22].

Для мониторинга рецидива ^1H -MRS демонстрирует высокую эффективность: повышение Cho/NAA и Cho/Cr, а также наличие лактата и липидов ассоциируются с рецидивом, тогда как при ради-

онекрозе наблюдается общее снижение всех метаболитов [23, 24].

Использование ^1H -MRS в комплексе с перфузионной МРТ и диффузионно-взвешенной визуализацией (DWI) повышает точность дифференциальной диагностики и позволяет проводить динамическую оценку ответа на терапию.

Обсуждение

Ограничения и перспективы применения ^1H -MRS

Несмотря на высокую клиническую значимость, применение протонной магнитно-резонансной спектроскопии (^1H -MRS) в нейроонкологической практике сопровождается рядом технических и методологических ограничений, которые затрудняют

её широкое клиническое внедрение и подчёркивают необходимость стандартизации.

Одной из основных технических проблем остаётся низкое отношение сигнал/шум, особенно при исследовании мелких структур мозга и использовании многовоксельных протоколов с высоким пространственным разрешением [25]. Ещё одним вызовом является подавление водного сигнала, который в несколько порядков превышает интенсивность метаболитических пиков и может маскировать сигналы таких ключевых соединений, как лактат (Lac) или липиды (Lip), особенно при коротких значениях TE [26].

¹H-MRS также отличается высокой зависимостью от качества настройки протокола и уровня подготовки специалиста. Результаты сильно варьируют в зависимости от выбора последовательности возбуждения (PRESS vs STEAM), точности позиционирования вокселя, способности интерпретировать спектры с частичным перекрытием пиков и наличием артефактов.

Отсутствие единых международных стандартов в клинической интерпретации спектров приводит к снижению воспроизводимости данных, ограничивает межцентровую сопоставимость результатов и сдерживает широкое применение метода в рутинной практике [27].

Будущее применения ¹H-MRS в нейроонкологии связано с её интеграцией в мультипараметрический подход, включающий перфузионную MPT, DWI и радиомические методы анализа [26].

Особую перспективу представляет использование искусственного интеллекта (AI) и машинного обучения для автоматической обработки спектров, выявления паттернов метаболитов и предсказания вероятности рецидива. Первые результаты в этой области уже демонстрируют высокую диагностическую ценность и воспроизводимость [27, 28].

По данным Hangel и соавт. (2023), следует, что применение AI-платформ для количественной оценки метаболитических карт (например, Cho/NAA, Lip/NAA) позволяет снизить зависимость от оператора, ускорить анализ и повысить интерпретируемость результатов в клинических условиях [27].

Дополнительным перспективным направлением является разработка стандартизированных количественных индексов, которые могут быть использованы для объективной оценки эффективности терапии, мониторинга состояния опухоли и прогноза выживаемости у пациентов с глиомами высокой степени злокачественности.

Заключение

¹H-MRS представляет собой высокоценный метод функциональной визуализации, позволяющий оценить не только центральную часть опухоли, но и метаболитические процессы в окружающей перифокальной зоне. При глиомах высокой степени злокачественности, особенно при глиобластоме, МР-спектроскопия позволяет выявить ранние признаки инфильтрации за пределами видимой опухоли.

Наиболее надёжными маркерами остаются повышение Cho, снижение NAA и увеличение соотношения Cho/NAA, что отражает опухолевую активность. Использование многовоксельной МР-спектроскопии с построением метаболитических карт значительно расширяет диагностические возможности метода и позволяет более точно планировать объём хирургического вмешательства и облучения.

Таким образом, интеграция данных ¹H-MRS в клинический протокол оценки глиом может повысить точность диагностики, улучшить стратификацию пациентов и оптимизировать персонализированные подходы к лечению.

Литература [References]

- 1 Louis D.N., Perry A., Wesseling P., Brat D.J., Cree I.A., Figarella-Branger D. et al. The 2021 WHO Classification of Tumors of the Central Nervous System: a summary. *Neuro-Oncology*. 2021;23(8):1231-1251. <https://doi.org/10.1093/neuonc/noab106>
- 2 Shukla G., Alexander G.S., Bakas S., Nikam R., Talekar K., Palmer J.D. et al. Advanced magnetic resonance imaging in glioblastoma: a review. *Chinese Clinical Oncology*. 2017;6(4):40. <https://doi.org/doi: 10.21037/cco.2017.06.28>
- 3 Захарова Н.Е., Баталов А.И., Погосбекян Э.Л., Горайнов С.А., Фадеева Л.М., Быканов А.Е., Тюрина 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. Zakharova N.E., Batalov A.I., Pogosebkyan 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>
- 4 Жукова Т.В., Шанько Ю.Г., Белецкий А.В., Иванова Н.Е., Забродская Ю.М., Ситовская Д.А., Зрелов А.А., Ширинский А.А. Патоморфологическая оценка перитуморозной зоны высокозлокачественных глиом как критерий минимизации объема оперативного вмешательства (оригинальное исследование). *Неврология и нейрохирургия. Восточная Европа*. 2022; 12(1):17-28. 4. Zhukova T.V., Shanko Yu.G., Beletsky A.V., Ivanova N.E., Zabrodskaya Yu.M., Sitovskaya D.A., Zrellov A.A., Shirinsky A.A. Pathomorphological assessment of the peritumorous zone of highly malignant gliomas as a criterion for minimizing the volume of surgical intervention (original research). *Neurology and Neurosurgery. Eastern Europe*. 2022; 12(1):17-28. (In Russ.) <https://doi.org/10.34883/Pl.2022.12.1.043>
- 5 Жукова Т.В., Шанько Ю.Г., Белецкий А.В., Ширинский А.А., Рябцева С.Н., Иванова Н.Е., Нечаева А.С., Потемкина Е.Г., Воробьева О.М., Ситовская Д.А., Зрелов А.А., Забродская Ю.М. Определение объема оперативного вмешательства при высокозлокачественных глиомах с учетом особенностей перитуморозной зоны. *Российский нейрохирургический журнал имени профессора А. Л. Поленова*. 2021;13(4):29-37. Zhukova T.V., Shan'ko Yu.G., Beletskiy A.V., Shirinsky A.A., Ryabtseva S.N., Ivanova N.E., Nechaeva A.S.,

- Potemkina Ye.G., Vorob'yeva O.M., Sitovskaya D.A., Zrellov A.A., Zabrodskaya Yu.M. Determination of the volume of surgical intervention for high-grade gliomas, taking into account the characteristics of the peritumorous zone. *Russian Neurosurgical Journal named after Professor A. L. Polenov*. 2021;13(4):29-37. (In Russ.)
- 6 Torp S.H., Solheim O., Skjalsvik A.J. The WHO 2021 Classification of Central Nervous System tumours: a practical update on what neurosurgeons need to know - a minireview. *Acta Neurochirurgica*. 2022;164(9):2453-2464. <https://doi.org/10.1007/s00701-022-05301-y>
 - 7 Гаранина Н.В., Гаранина Н.В., Долгушин М.Б., Лаптева М.Г., Фадеева Л.М., Сашин Д.В. Особенности применения диффузионно-куртозисной МРТ в дифференциальной диагностике глиальных опухолей головного мозга и солитарных метастазов. *Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия*. 2023;6(1):26-40. Garanina N.V., Dolgushin M.B., Lapteva M.G., Fadeeva L.M., Sashin D.V. Peculiarities of the Application of Diffusion-Curtosis MRI in the Differential Diagnosis of Glial Brain Tumors and Solitary Metastasis. *Journal of oncology: diagnostic radiology and radiotherapy*. 2023;6(1):26-40. (In Russ.) <https://doi.org/10.37174/2587-7593-2023-6-1-26-40>
 - 8 Cui Y., Zeng W., Jiang H., Ren X., Lin S., Fan Y. et al. Ratio in Postoperative Peritumoral Edema Zone Is Associated With Earlier Recurrence of Glioblastoma. *Frontiers in Neurology*. 2020;4(11):592155. <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.592155>
 - 9 Liu H., Zhang Q., Niu S., Liu H. Value of Magnetic Resonance Images and Magnetic Resonance Spectroscopy in Diagnosis of Brain Tumors under Fuzzy C-Means Algorithm. *Contrast Media & Molecular Imaging*. 2022;2022(1):331512. <https://doi.org/10.1155/2022/331512>
 - 10 Egerton A. The potential of ¹H-MRS in CNS drug development. *Psychopharmacology*. 2021;238(5):1241-1254. <https://doi.org/10.1007/s00213-019-05344-7>
 - 11 Aida N. ¹H-MR spectroscopy of the early developmental brain, neonatal encephalopathies, and neurometabolic disorders. *Magnetic Resonance in Medical Sciences*. – 2022;21(1):9-28. <https://doi.org/10.2463/mrms.rev.2021-0055>
 - 12 Pellegatta S., Valletta L., Corbetta C., Patanè M., Zucca I., Riccardi Sirtori F. et al. Effective immuno-targeting of the IDH1 mutation R132H in a murine model of intracranial glioma. *Acta neuropathologica communications*. 2015;3(4):1-12. <https://doi.org/10.1186/s40478-014-0180-0>
 - 13 Padelli F., Mazzi F., Erbetta A., Chiapparini L., Doniselli F.M., Palermo S. et al. In vivo brain MR spectroscopy in gliomas: clinical and pre-clinical chances. *Clinical and Translational imaging*. 2022;10(5):495-515. <https://doi.org/10.1007/s40336-022-00502-y>
 - 14 Fairgrieve-Park L., Fallone C.J., Yahya A. Long TE PRESS and STEAM for measuring the triglyceride glycerol CH₂ protons at 3T. *NMR in Biomedicine*. 2019;32(2):e4021. <https://doi.org/10.1002/nbm.4021>
 - 15 Tal A., Gonen O. Spectroscopic localization by simultaneous acquisition of the double-spin and stimulated echoes. *Magnetic Resonance in Medicine*. 2015;73(1):31-43. <https://doi.org/10.1002/mrm.25112>
 - 16 Ballestin A., Armocida D., Ribecco V., Seano G. Peritumoral brain zone in glioblastoma: Biological, clinical and mechanical features. *Frontiers in Immunology*. 2024;15:1347877. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1347877>
 - 17 Cordova J.S., Shu H.-K.G., Liang Z., Gurbani S.S., Cooper L.A.D., Holder C.A. et al. Whole-brain spectroscopic MRI biomarkers identify infiltrating margins in glioblastoma patients. *Neuro-oncology*. 2016;18(8):1180-9. <https://doi.org/10.1093/neuonc/nov036>
 - 18 Tarnawski R., Sokol M., Pieniazek P., Maciejewski B., Walecki J., Mischczyk L. et al. ¹H-MRS in vivo predicts the early treatment outcome of postoperative radiotherapy for malignant gliomas. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*. 2002;52(5):1271-6. [https://doi.org/10.1016/S0360-3016\(01\)02769-9](https://doi.org/10.1016/S0360-3016(01)02769-9)
 - 19 Tolia M., Verganelakis D., Tsoukalas N., Kyrgias G., Papathanasiou M., Mosa E. et al. Prognostic value of MRS metabolites in postoperative irradiated high grade gliomas. *BioMed Research International*. 2015;2015):341042. <https://doi.org/10.1155/2015/341042>
 - 20 Ruiz-Rodado V., Brender J.R., Cherukuri M.K., Gilbert M.R., Larion M. Magnetic resonance spectroscopy for the study of CNS malignancies. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*. 2021;122:23-41. <https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2020.11.001>
 - 21 Ikeguchi R., Shimizu Y., Abe K., Shimizu S., Maruyama T., Nitta M. et al. Proton magnetic resonance spectroscopy differentiates tumefactive demyelinating lesions from gliomas. *Multiple Sclerosis and Related Disorders*. 2018;26:77-84. <https://doi.org/10.1016/j.msard.2018.08.025>
 - 22 Lu W., Jin F., Zou Y., Liu Y., Gao P., Zhao Y. et al. ¹H-MRS parameters in non-enhancing peritumoral regions can predict the recurrence of glioblastoma. *Scientific Reports*. 2024;14 - 292958. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80610-z>
 - 23 Crain I.D., Elias P.S., Chapple K., Schek A.C., Karis J.P., Preul Mark C. Improving the utility of ¹H-MRS for the differentiation of glioma recurrence from radiation necrosis. *Journal of Neuro-oncology*. 2017;133(1):97-105. <https://doi.org/10.1007/s11060-017-2407-y>
 - 24 Feng A., Yuan P., Huang T., Li L., Lyu J. Distinguishing tumor recurrence from radiation necrosis in treated glioblastoma using multiparametric MRI. *Academic Radiology*. 2022;29(9):1320-1331. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2021.11.008>
 - 25 Henning A. Proton and multinuclear MR spectroscopy in the human brain at ultra-high field: a review. *NeuroImage*. 2018;168:181-198. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.06.046>
 - 26 Aamir M., Rahman Z., Bhatti U.A., Abro W.A., Bhutto J.A., He Z. An automated deep learning framework for brain tumor classification using MRI imagery. *Scientific Reports*. 2025;15(1):17593. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02209-2>
 - 27 Hangel G., Schmitz-Abecassis B., Sollmann N., Pinto J., Arzanforoosh F., Barkhof F. et al., Advanced MR Techniques for Preoperative Glioma Characterization: Part 2. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2023;57(4):1676-1695. <https://doi.org/10.1002/jmri.28663>
 - 28 Маслов Н.Е., Труфанов Г.Е., Моисеенко В.М., Валенкова Д.А., Ефимцев А.Ю., Плахотина Н.А., Сидорина А.С. Разработка принципов адаптации радиогеномного подхода к визуализации глиальных опухолей в рамках инициальных диагностических мероприятий. *Вестник медицинского института «Реавиз»: реабилитация, врач и здоровье*. 2024;14(1):168-176. Maslov N.E., Trufanov G.E., Moiseenko V.M., Valenkova D.A., Efimtsev A.Yu., Plakhotina N.A., Sidorina A.S. Radiogenomic approach to glial tumors imaging under conditions of initial diagnostic measures: adaptation principles development. *Bulletin of the Medical Institute "REAVIZ" (Rehabilitation, Doctor and Health)*. 2024;14(1):168-176. (In Russ.) <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2024.1.MIM.3>

Авторская справка**Сидорина Анастасия Сергеевна**

Врач-рентгенолог отделения магнитно-резонансной томографии, аспирант кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой института медицинского образования, Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова.

ORCID 0000-0001-5439-4189; anastasia-sidorinaa@yandex.ru

Вклад автора: научное обоснование, методология, верификация данных, анализ данных, анализ литературных источников.

Просалова Наталия Валерьевна

Врач рентгенолог отделения лучевой диагностики, Санкт-Петербургский КНПЦ СВ МП (онкологический) имени Н.П. Напалкова.

ORCID 0009-0000-5601-7862; prosalova98@inbox.ru

Вклад автора: научное обоснование, методология, верификация данных, анализ данных, анализ литературных источников.

Дорохова Дария Дмитриевна

Ординатор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой института медицинского образования, Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова.

ORCID 0009-0007-3646-4439; SPIN-код: 2161-0857;

dariadorokhowa@yandex.ru

Вклад автора: сбор и обработка материала, написание и редактирование текста.

Прокудин Михаил Юрьевич

Канд. мед. наук, ассистент кафедры нервных болезней, Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова.

ORCID 0000-0003-1545-8877; SPIN-код: 4021-4432;

prmhail@mail.ru

Вклад автора: сбор и обработка материала, написание и редактирование текста.

Мартынов Борис Владимирович

Д-р мед. наук, доцент, заведующий отделением, врач-нейрохирург кафедры нейрохирургии, Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова.

ORCID 0000-0002-8459-2466; SPIN-код: 9953-3997;

omartynova2005@rambler.ru

Вклад автора: сбор и обработка материала, написание и редактирование текста.

Рыжков Антон Владимирович

Врач рентгенолог высшей категории, заведующий отделением магнитно-резонансной томографии, Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова.

ORCID 0000-0001-5226-1104; SPIN-код: 6745-3075;

pr@almazovcentre.ru

Вклад автора: сбор и обработка материала, написание и редактирование текста.

Труфанов Геннадий Евгеньевич

Д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедрой лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой института медицинского образования, Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова.

ORCID 0000-0002-1611-5000; SPIN-код: 3139-3581;

trufanovge@mail.ru

Вклад автора: концепция исследования, научное редактирование статьи.

Author's reference**Anastasiya S. Sidorina**

Radiologist at the Department of Magnetic Resonance Imaging, post-graduate student at the Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging at the Clinic of the Institute of Medical Education, Almazov National Medical Research Centre.

ORCID 0000-0001-5439-4189; anastasia-sidorinaa@yandex.ru

Author's contribution: scientific justification, methodology, data verification, data analysis, analysis of literary sources.

Nataliya V. Prosalova

Radiologist at the Department of Radiation Diagnostics, St. Petersburg State Medical University named after N.P. Napalkov.

ORCID 0009-0000-5601-7862; prosalova98@inbox.ru

Author's contribution: scientific substantiation, methodology, data verification, data analysis, analysis of literary sources.

Daria D. Dorokhova

Resident of the Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging with the clinic of the Institute of Medical Education, Almazov National Medical Research Centre.

ORCID 0009-0007-3646-4439; SPIN code: 2161-0857;

dariadorokhowa@yandex.ru

Author's contribution: collecting and processing material, writing and editing text.

Mikhail Yu. Prokudin

Cand. Sci. (Med.), Assistant Professor at the Department of Nervous Diseases, S.M. Kirov Military Medical Academy.

ORCID 0000-0003-1545-8877; SPIN code: 4021-4432;

prmhail@mail.ru

Author's contribution: collecting and processing material, writing and editing text.

Boris V. Martynov

Dr. Sci. (Med.), Docent, Neurosurgeon at the Department of Neurosurgery, S.M. Kirov Military Medical Academy.

ORCID 0000-0002-8459-2466; SPIN code: 9953-3997;

omartynova2005@rambler.ru

Author's contribution: collecting and processing material, writing and editing text.

Anton V. Ryzhkov

Radiologist of the highest category, Head of the Magnetic Resonance Imaging Department, Almazov National Medical Research Centre.

ORCID 0000-0001-5226-1104; SPIN-код: 6745-3075;

pr@almazovcentre.ru

Author's contribution: collecting and processing material, writing and editing text.

Gennadiy E. Trufanov

Dr. Sci. (Med.), Professor of the Department of Radiology Diagnostics and Medical Imaging with the clinic of the Institute, Almazov National Medical Research Centre.

ORCID 0000-0002-1611-5000; SPIN-код: 3139-3581;

trufanovge@mail.ru

Author's contribution: research concept, scientific editing of the article.