

ISSN 2311-4495

ISSN 2410-5155 (Online)

УДК 616-053-073.75

<https://doi.org/10.18705/2311-4495-2026-13-1-92-107>

Выявление рецидивов глиальных опухолей головного мозга на основе количественного анализа однофотонной эмиссионной компьютерной томографии с ^{99m}Tc -Технетрилом и перфузионной магнитно-резонансной томографии в режиме артериальной спиновой метки

В. Ю. Усов¹, И. С. Карабанов¹, С. М. Минин¹, А. А. Тулупов²,
Ли Юн-Пин³, Ж. Ж. Анашбаев¹, П. А. Семин¹, Шан Я-Мин³,
Н. А. Никитин¹, Е. С. Половников¹, М. Е. Амелин⁴,
Ю. Б. Лишманов⁵

Контактная информация:

Усов Владимир Юрьевич,
ФГБУ «НМИЦ им. ак. Е. Н. Мешалкина»
Минздрава России,
ул. Речуновская, д. 15, Новосибирск,
Россия, 630055.
E-mail: ussov1962@yandex.ru

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Национальный медицинский исследовательский центр имени
академика Е. Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения
Российской Федерации, Новосибирск, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт «Международный томографический центр» Сибирского
отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

³ Китайско-Российский научно-технический парк, Чанчунь, Китай

⁴ Государственное бюджетное учреждение здравоохранения
Новосибирской области «Государственная Новосибирская областная
клиническая больница», Новосибирск, Россия

⁵ Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский Томский политехнический университет», Томск,
Россия

Резюме

Цель исследования — сравнительно изучить показатели опухолевого кровотока у нейроонкологических пациентов при безрецидивном течении и рецидивах глиальных опухолей, с помощью ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -Технетрилом — онкотропным радиофармпрепаратом (РФП), а также МРТ в режиме артериальной спиновой метки (АСМ). **Материалы и методы.** В исследование ретроспективно были включены результаты лечения в 2023–2024 гг. 23 пациентов с глиальными опухолями головного мозга (15 — с глиомами 2–4 степени анаплазии и 8 — с глиобластомами), которым были выполнены как МРТ в режиме АСМ, так и ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -Технетрилом. Наличие того и другого исследования было основным критерием включения. Больные с церебральными инсультами и травмами мозга в исследование не включались. Пациенты были разделены на группы: 1 — с безрецидивным течением (11 человек); 2 — у кого имел место рецидив/продолженный рост (12 человек), пятеро из них скончались в течение двух лет. Всем были выполнены МРТ головного мозга (3,0 Т) в режиме АСМ с расчетом кровотока в единицах мл/мин/100 см³,

и ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -Технетрилом с расчетом кровотока в опухолях по методу Кривоногова-Минина-Лишманова, как: $PKpOn_{\text{ОФЭКТ}} = CBP_{^{99m}\text{Tc-Технетрил}} * (MO/ВесТелаПациента) * 100$, где $CBP_{^{99m}\text{Tc-Технетрил}}$ — стандартизованная величина поглощения РФП, МО — минутный объем, 100 — коэффициент перевода в «мл/мин/100 см³ ткани». **Результаты.** МРТ в режиме АСМ и ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -Технетрилом по величинам опухолевого кровотока достоверно коррелируют. При наличии узловой структуры в области удаленной опухоли и кровотоке в ней > 23 мл/мин/100 см³ вероятен продолженный рост опухоли. **Заключение.** МРТ в режиме АСМ и ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -Технетрилом должны более широко использоваться для раннего контроля пациентов после радикального удаления глиальных опухолей. Целесообразно их дальнейшее изучение, в том числе в межцентровых исследованиях.

Ключевые слова: МРТ, ОФЭКТ/КТ, артериальное спинозное мечение, ^{99m}Tc -Технетрил, парамагнитное контрастирование, фармакокинетика, нейроонкология, глиомы, церебральные метастазы

Для цитирования: Усов В.Ю., Карабанов И.С., Минин С.М. и др. Выявление рецидивов глиальных опухолей головного мозга на основе количественного анализа однофотонной эмиссионной компьютерной томографии с ^{99m}Tc -Технетрилом и перфузионной магнитно-резонансной томографии в режиме артериальной спинозной метки. *Трансляционная медицина*. 2026;13(1):92–107. <https://doi.org/10.18705/2311-4495-2026-13-1-92-107>; <https://elibrary.ru/NLBIXH>

Detection of relapses of glial brain tumors using quantification of single-photon emission computed tomography with ^{99m}Tc Technetrit and of perfusion magnetic resonance imaging in arterial spin labelling mode

Wladimir Yu. Ussov¹, Ilya S. Karabanov¹, Stanislav M. Minin¹,
Andrey A. Tulupov², Li YongPing³, Zhanat Zh. Anashbaev¹,
Pavel A. Semin¹, Shan YaMing³, Nikita A. Nikitin¹,
Evgenii S. Polovnikov¹, Mikhail E. Amelin⁴, Yuri B. Lishmanov⁵

Corresponding author:

Wladimir Yu. Ussov,
Meshalkin National Medical Research
Center,
15 Rechkunovskaya str., Novosibirsk, Russia,
630055.
E-mail: ussov1962@yandex.ru

¹ Academician E.N. Meshalkin National Medical Research Center of the Ministry of Health of the Russia, Novosibirsk, Russia

² International Tomography Center Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

³ Changchun Sino-Russian Science and Technology Park, Changchun, China

⁴ State Budgetary Healthcare Institution of the Novosibirsk Region

“State Novosibirsk Regional Clinical Hospital”, Novosibirsk, Russia

⁵ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract

The aim of the study was to quantify and compare the parameters of cerebral tumor blood flow in neuro-oncological neurosurgical patients with relapse-free course and recurrence of glial low-grade tumors using SPECT-CT with ^{99m}Tc -Technetrit as a tumorotropic radiopharmaceutical, and MRI in the arterial spin labelling (ASL) mode. **Materials and methods.** The study included 23 patients treated 2019-2020 with glial brain tumors (15 with grade 2–4 anaplasia gliomas and 8 with glioblastomas). Of these, 16 with glial brain tumors (13 — gliomas and 3 — glioblastomas) after radical tumor removal followed by external gamma therapy, and 7 with inoperable formations were examined after chemoradiotherapy, without surgical removal. The patients were divided into groups 1 — with a relapse-free course, 11 people; of those who had a relapse/continued growth,

12 patients (group 2), five of them died during a two-year follow-up. All underwent MRI of the brain (MRI 3.0 T) in ASL mode with calculation of cerebral blood flow in absolute units — as ml/min/100 cm³, as well as SPECT-CT with ^{99m}Tc-Techne-tril on a gamma camera with the ability to determine standardized uptake values (SUV), with calculation of blood flow in tumor formations ($PKpOn_{ОФЭКТ}$), using the method KML (Krivonogov-Minin-Lishmanov), as $PKpOn_{ОФЭКТ} = CBП_{^{99m}Tc-Технетрил} * (MO/Body Weight) * 100$, where $CBП_{^{99m}Tc-Технетрил}$ is the standardized value of rfp uptake, MO is the minute volume, 100 is the conversion coefficient for representing the result in the usual units “ml/min/100 cm³ of tissue”. **Results.** ASL MRI and SPECT-CT with ^{99m}Tc-Techne-tril methods significantly correlate with each other and are interchangeable in terms of the obtained values of blood flow of malignant tumors, both maximum and average in the studied regions. If there is a visual nodular structure in the area of the removed brain tumor, and blood flow anywhere within it is more than 23 ml/min/ 100 cm³, the presence of continued growth or recurrence of a low-grade glial neoplasm is likely. **Conclusion.** As follows from the presented visual-semiotic and computational data of ASL MRI and SPECT CT with ^{99m}Tc-Techne-tril, these methods should reasonably be used as widely as possible for early monitoring of the postoperative condition in patients after radical removal of glial low-grade brain tumors. It is advisable to further their comparative and joint study, including in inter-center studies.

Keywords: MRI, SPECT/CT, arterial spin labelling, ^{99m}Tc-Techne-tril, paramagnetic contrast enhancement, pharmacokinetics, neuro-oncology, gliomas, meningiomas, brain metastases

For citation: Ussov WYu, Karabanov IS, Minin SM, et al. Detection of relapses of glial brain tumors using quantification of single-photon emission computed tomography with ^{99m}Tc Techne-tril and of perfusion magnetic resonance imaging in arterial spin labelling mode. *Translational Medicine*. 2026;13(1):92–107. <https://doi.org/10.18705/2311-4495-2026-13-1-92-107>; <https://elibrary.ru/NLBIXH>

Введение

Ранняя диагностика и детальная патофизиологическая оценка рецидивов низкодифференцированных глиальных опухолей головного мозга сегодня является одной из важнейших задач нейрохирургии, нейроонкологии, лучевой диагностики и лучевой терапии [1, 2], поскольку благодаря прогрессу лучевых технологий наружной стереотаксической аблационной радиотерапии в нейроонкологии при своевременной диагностике и топической оценке резидуальной или рецидивной опухолевой ткани оказывается возможным радикально и полностью некротизировать ее за счет высокодозного облучения всего выявленного объема опухоли [3, 4].

Поэтому как можно более точная диагностика состояния области нейрохирургического вмешательства и выявление рецидивов глиальных опухолей имеет первостепенное значение для послеоперационного ведения и прогноза у таких пациентов. Как правило, она осуществляется на основе томографической визуализации наиболее важных патофизиологических показателей состояния опухоли, тогда как чисто анатомические методы — рентгеновская компьютерная томография — менее эффективны [5, 6]. Это в первую очередь — нарушение гистогематического, то есть в случае головного мозга — гематоэнцефалического, барьера в опухолях головного мозга [6, 7], усиленное поглощение глюкозы злокачественными глиомами

[7, 8] и усиленное кровоснабжение опухолей, даже по сравнению с высоким кровотоком тканей здорового мозга [5].

Соответственно этим патофизиологическим подходам, визуализация опухолей головного мозга наиболее эффективно и на ранних стадиях осуществляется методом контраст-усиленной МРТ, поскольку гидрофильные парамагнетики — достоверные маркеры повреждения гематоэнцефалического барьера [9, 10], либо позитронной эмиссионной компьютерной томографии (ПЭТ) с ¹⁸F-фтордезоксиглюкозой (¹⁸F-ФДГ) [8, 11], методом однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ) с маркерами опухолевого кровотока — такими радиофармпрепаратами, как ^{99m}Tc-метоксиизобутилизонитрил (^{99m}Tc-Технетрил) или ^{99m}Tc-Тетрофосмин [11, 12]. Преимуществом ОФЭКТ с ^{99m}Tc-Технетрилом является то, что этот радиофармпрепарат — маркер именно опухолевого кровотока, в отличие от других онкотропных соединений ^{99m}Tc, кинетика которых носит многофакторный и неоднозначный характер [13, 14]. Накопление ^{99m}Tc-Технетрила в здоровой ткани мозга практически отсутствует [5]. Поэтому его использование для диагностики опухолевых процессов особенно диагностически чувствительно [12, 15].

В последнее время кровотоков мозга — и опухолевых, и нормальных анатомических структур — чрезвычайно точно оценивается вновь предложенным

методом МРТ в режиме артериальной спиновой метки (АСМ, в английской нотации — ASL, arterial spin labelling), когда за счет преднамагничивания притекающей артериальной крови и режимов быстрого сканирования мозга с учетом этого преднамагничивания удается визуализировать и количественно охарактеризовать артериальный мозговой кровоток [1, 16]. АСМ позволила достоверно лучше визуально диагностировать как первичные случаи глиом, так и рецидивные, и проспективно контролировать лечение [16–18]. Тем не менее, прямая задача установки количественных границ между случаями безрецидивного течения, с одной стороны, и продолженного роста или рецидивирования — с другой, пока не решена. Далее, количественная оценка опухолевого кровотока глиом при рецидивах до сих пор осуществляется далеко не в каждом исследовании не у каждого пациента, в особенности это касается ОФЭКТ и совмещенной ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -Технетрилом. В последнее время, благодаря использованию для ОФЭКТ/КТ новых гамма-эмиссионных томографов с возможностями количественной оценки локального накопления радиофармпрепарата в абсолютных единицах (т. е. как КБк/см³), удалось разработать методы расчета опухолевого кровотока в абсолютных единицах — в мл/мин/100 см³ [5].

Поэтому в данном исследовании мы как раз и поставили **целью** количественно изучить и сравнить показатели церебрального опухолевого кровотока при безрецидивном течении и рецидивах глиальных низкодифференцированных опухолей с помощью методов ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -Технетрилом и МРТ в режиме АСМ. Это могло бы позволить уже в ближайшей перспективе достоверно улучшить послеоперационный томографический контроль пациентов, оперируемых по поводу низкодифференцированных глиом, а стало быть — тактику и прогноз.

Материалы и методы

Пациенты. В исследование были включены данные 23 пациентов с глиальными опухолями головного мозга (15 человек с глиомами 2–4 степени анаплазии и 8 — с глиобластомами), которым были выполнены как МРТ в режиме артериальной спиновой метки, так и ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -Технетрилом — наличие того и другого исследования и было основным критерием включения. Технических погрешностей проведения исследований или экстравазации радиофармпрепарата при введении его при ОФЭКТ/КТ — не было. Однако пациенты с ранее перенесенными церебральными инсультами и травматическими повреждениями ЦНС в исследование не включались. Поскольку исследование включало только обработку данных с расчетом опухолевого кровотока и не требовало повторного

исследования и какого-то воздействия на пациента, этический комитет констатировал, что информированное согласие не требуется. Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБУ «НМИЦ им. ак. Е. Н. Мешалкина» Минздрава России (протокол от 05.09.2025) как полностью соответствующее требованиям Хельсинкского протокола и другим нормативным актам. Из включенных в исследование — 16 больных с глиальными опухолями головного мозга (13 — с глиомами и 3 — с глиобластомами) были обследованы после радикального удаления опухоли с последующей наружной гамма-терапией и адъювантной химиотерапией, а 7 пациентов с неоперабельными новообразованиями обследовались после комплексного химиолучевого лечения, без хирургического удаления — в силу анатомо-топографической невозможности такового. При этом лучевую терапию проводили в режиме стандартного фракционирования, ротационным способом и статическим методом. Разовая очаговая доза составляла 2,0 Гр, 5 раз в неделю до достижения суммарной очаговой дозы 56–60 Гр, размер полей при этом был не менее 10x10 см. При этом вся зона интереса — контуры опухоли — была охвачена 95 % изодозой. Как компонент комплексной химиолучевой терапии эти пациенты (7 человек) получали препарат Темодал в разовой дозе 75 мг/кв. м (120–140 мг) за час до проведения дистанционной гамма-терапии в течение до 40 дней (в суммарной дозе 5000–5900 мг). Далее в постлучевом периоде 6 больных получили 6 курсов химиотерапии Темодалом по схеме 200 мг/м² (280–400 мг) по 5 дней через каждые 23 дня, суммарная доза за курс 1400–2000 мг. Во всех случаях после проведенного исследования был определен срок последующей выживаемости пациентов, по данным первичного звена здравоохранения и учреждений регистрации гражданского состояния. Соответственно пациенты были разделены на группы: с последующим безрецидивным течением, 11 человек (группа 1), и тех, у кого имел место рецидив/продолженный рост опухоли, потребовавший повторных эпизодов лучевой терапии, 12 человек (группа 2), пятеро из них скончались в течение двухлетнего наблюдения.

ОФЭКТ головного мозга с ^{99m}Tc -Технетрилом выполнялась у 18 пациентов на одно- и двухдетекторных гамма-камерах (ОФЭКТ системе Gemini 700 (Technicare), с последующим цифровым совмещением с данными КТ, 15 случаев; и ОФЭКТ/КТ системе NM/CT 870 DR (GE Healthcare) — 3 случая), спустя 12–15 мин. после введения 540–720 МБк радиофармпрепарата (из стандартного набора для меченя «Технетрил» (НПФ «Диамед», Россия)), как 32–64 планарных проекции на 360 град. оборота детектора с набором более 50000 имп. в матрицу 64x64 на проекцию, с реконструкцией аксиальных,

фронтальных и — в ходе обработки данных — произвольно-расположенных срезов и с определением также стандартизованных величин поглощения для исследуемых анатомических и патологических образований (СВП). Данные КТ при этом использовались для улучшения реконструкции ОФЭКТ, а самостоятельно не анализировались.

Расчет опухолевого кровотока опухолей мозга проводился по методу КМЛ (Кривоногов Н.Г.— Минин С.М.—Лишманов Ю.Б. [4, 5]) как

$$PKpOn_{\text{ОФЭКТ}} = CBП_{99mTc\text{-Технетрил}} * (MO / \text{ВесТелаПациента}) * 100, \quad (1)$$

где 100 — коэффициент перевода для представления результата в привычных единицах «мл/мин/100 см³ ткани».

Рассчитывался средний по перфузируемому объему опухоли кровотока, а также максимальный очаговый кровотока в опухоли. Определялся объем перфузируемой ткани опухоли, в см³, как сумма объемов вокселей опухоли, поглощающих ^{99m}Tc-Технетрил при ОФЭКТ.

Количественное определение мозгового опухолевого кровотока с помощью магнитно-резонансного протокола артериальной спиновой метки на магнитно-резонансном томографе с напряженностью поля 3,0 T SIGNA Premier включало рутинные МР-последовательности с добавлением контрастных методик Т1-взвешенных изображений и бесконтрастной 3D артериальной спиновой метки, по стандартизированной методике [1, 17, 18]. Во всех случаях исследование в режиме АСМ выполнялось до динамического МРТ исследования с парамагнитным контрастным усилением, до введения контраста-парамагнетика. При этом во всех случаях величина параметра PLD составляла 2000 мс, толщина срезов 4 мм, с реконструкцией не менее 35 срезов на область головного мозга, при их строго аксиальном расположении, так, что головной мозг охватывался полностью. Последующая обработка и количественный расчет абсолютных величин опухолевого кровотока осуществлялись на выделенной рабочей станции МР-томографа.

Поскольку во всех случаях исследование с парамагнитным контрастным усилением носило динамический характер после болюсного введения парамагнетика, по данным динамики накопления препарата в опухолевой ткани и клиренса его из крови (т. е. из области задней части сагиттального синуса — наиболее кровенаполненного участка на аксиальных томосрезах МРТ головы), рассчитывался показатель коэффициента диффузии парамагнетика

из крови в опухоль (удельной скорости, или тканевого клиренса, как мл/мин/100 г ткани), как ранее нами было описано в общем случае, для любых опухолей, обследуемых методом МРТ с динамическим парамагнитным контрастированием [21]. Кратко, расчет производился по следующему принципу, первоначально сформулированному в классической статье Б. Я. Наркевича и соавторов (1992) [22] и лишь реализованному нами в частной ситуации [21] как

$$K_{\text{Кровь-Опухоль}} = \frac{C_{\text{Опухоль}}(T)}{\int_0^T C_{\text{Кровь}}(t) dt}, \quad (2)$$

где $C_{\text{Кровь}}(t)$ — содержание парамагнетика в крови в момент времени (t) после болюсного внутривенного введения, $C_{\text{Опухоль}}(t)$ — содержание парамагнетика в ткани опухоли в момент времени (t), $K_{\text{Кровь-Опухоль}}$ — линейный коэффициент диффузии парамагнетика из крови в опухоль по градиенту концентрации, предполагается, что активный направленный транспорт отсутствует.

Концентрация препарата в опухоли здесь — в формуле 2 — является величиной, усредненной для локального объема опухолевой ткани, то есть без выделения компонентов межклеточного вещества опухоли и внутриклеточного пула парамагнетика. Величины концентраций в крови и в опухоли для контрастного препарата — парамагнетика, могут быть оценены по интенсивности соответствующих локальных сигналов Т1-ВИ МРТ. Для корректности модели существенно лишь, чтобы и для опухоли, и для пула крови соотношение между концентрацией парамагнетика и интенсивностью Т1-ВИ было бы одинаковым и линейным или квазилинейным. Тогда, учитывая, что формула (2) расчета скорости поглощения контраста опухолью представляет собой отношение, интенсивности Т1-ВИ можно полноценно и вычислительно строго использовать вместо абсолютных величин концентраций препаратов.

Статистическая обработка результатов исследования кривых «интенсивность — время», данных локального накопления парамагнетика или ^{99m}Tc-Технетрила у пациентов, а также и групповых численных результатов исследований проводилась с помощью пакета прикладных программ обработки и визуализации данных Origin 6.1 (Origin Labs, Техас, США).

Результаты

Наряду с данными количественных расчетов опухолевого кровотока, которые были получены по представленным методикам и статистически характеризовали обследованные группы, значительный интерес представляет собственно визуальная

семиотика опухолевых поражений головного мозга, в том числе в режиме АСМ.

Приводим здесь типичный пример радикально прооперированной низкодифференцированной глиальной опухоли, без признаков последующего рецидива или продолженного роста. Исходное исследование (рис. 1) является ярким примером интенсивного накопления в объеме опухоли контраста-парамагнетика (рис. 1, А, В), а также достоверного узлового опухолевого накопления ^{99m}Tc -Технетрила (рис. 1, В), с участками опухолевого кровотока до 35–42 мл/мин/100 г ткани, которые типичны именно для злокачественных низкодифференцированных процессов.

Послеоперационная картина у того же пациента (рис. 2) характеризуется полным отсутствием на месте опухоли каких-либо узлов усиленного накопления контраста-парамагнетика при МРТ с парамагнитным контрастным усилением (рис. 2, А), а также патологического включения ^{99m}Tc -Технетрила при ОФЭКТ (рис. 2, В) и отсутствием участков усиленного кровотока по очаговому типу при МРТ в режиме АСМ (рис. 2, В).

Семиотика визуализации случаев продолженного роста/рецидивирования глиом (типичный представлен на рис. 3) радикально отличалась от случаев безрецидивного неосложненного течения и характеризовалась неперенным наличием интенсивно перфузируемых очагов повышенного кровотока как в режиме АСМ (рис. 3, В), так и по данным локальной аккумуляции ^{99m}Tc -Технетрила (рис. 3, В).

Таким образом, уже визуальный анализ картины сочетанного ОФЭКТ-КТ и МРТ-АСМ томографического исследования, даже до проведения расчетов величин кровотока и показателей повреждения гистогематического барьера в опухоли, позволяет выделить случаи узлового рецидивирования злокачественных новообразований глиального ряда.

Количественные показатели, рассчитанные и представленные по группам безрецидивного неосложненного (группа 1 — см. раздел «Материалы и методы») и рецидивного (группа 2) течения, объективизируют и закрепляют это визуальное различие, причем оба метода — и МРТ-АСМ, и ОФЭКТ-КТ —

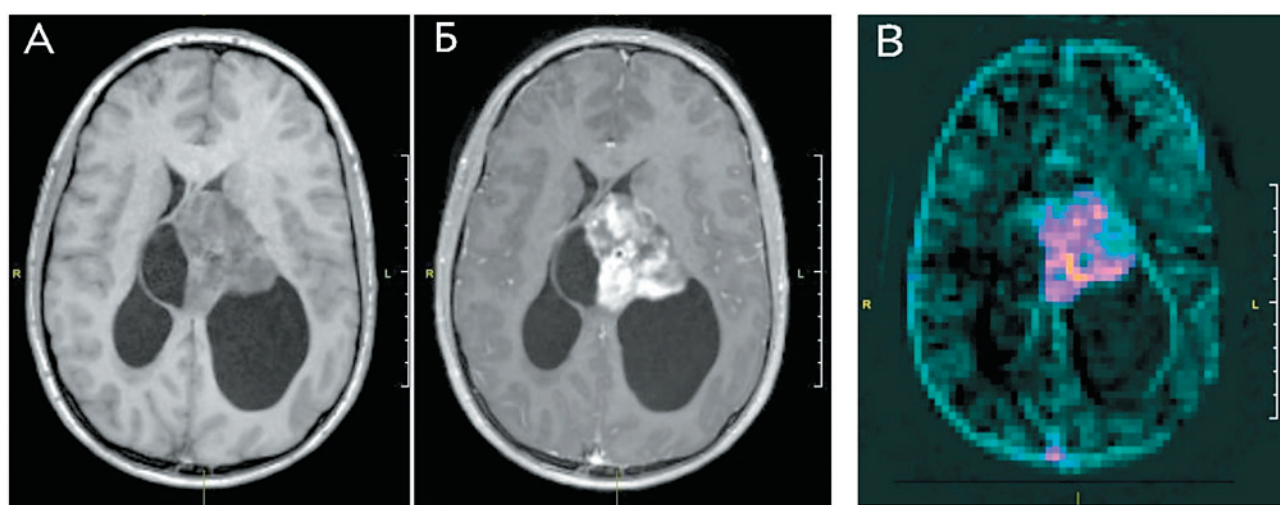


Рис. 1. Предоперационная мультимодальная визуализация опухолевого поражения — низкодифференцированной глиомы левого бокового желудочка

Примечания: А — картина Т1-взвешенного изображения МРТ головного мозга исходно до парамагнитного контрастного усиления. В — после контрастирования 1М раствором гадобутола. В — картина накопления в толще опухоли ^{99m}Tc -Технетрила при ОФЭКТ головного мозга с этим радиофармпрепаратом. Исследования при поступлении пациента, до начала лечения. Обращает на себя внимание высокая интенсивность контрастного усиления опухолевого новообразования (В) и столь же высокая степень накопления ^{99m}Tc -Технетрила при ОФЭКТ в опухоли левого бокового желудочка (В).

Fig. 1. Initial preoperation multimodal imaging of a tumor in the left lateral ventricle.

Notes: In particular — the picture of T1-weighted MRI image of the brain initially before paramagnetic contrast enhancement (A) and after contrast with 1M gadobutrol solution (B). B — is a picture of accumulation of ^{99m}Tc -Technetrit in the tumor thickness during brain SPECT with this radiopharmaceutical. Studies at the patient's admission, before the start of neoadjuvant chemotherapy. Attention is drawn to the high intensity of contrast enhancement of the tumor (B), and the equally high degree of accumulation of ^{99m}Tc -Technetrit during SPECT in the tumor of the left lateral ventricle (B).

высокодостоверно различают эти две группы, так, что значения показателей в них практически не пересекаются (см. табл.).

При индивидуальном анализе значений показателей максимального кровотока — при его расчете как методом ОФЭКТ с ^{99m}Tc -Технетрилом, так и МРТ-АСМ, по группам 1 и 2 (см. рис. 4, А и Б), оказывается, что при наличии в области опухолевого процесса после удаления участков с кровотоком более 23–25 мл/мин/100 см³ — пациент неизбежно относится ко второй, «рецидивной» группе.

Методически при этом неизбежно возникает вопрос о взаимозаменяемости, если так можно выразиться, методов МРТ-АСМ и ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -Технетрилом. При корреляционном индивидуальном анализе данных, полученных у пациентов, у которых

были выполнены оба томографических метода исследования (и МРТ-АСМ, и ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -Технетрилом), количественное корреляционное соотношение носит линейный характер, коэффициент корреляции значений кровотока того и другого методов был исключительно высок, составляя более 0,85 (рис. 5), что как раз достоверно подтверждает их методическую взаимозаменяемость.

Обобщая, методы перфузионной ОФЭКТ/КТ головного мозга с ^{99m}Tc -Технетрилом, и МРТ в режиме артериальной спиновой метки однозначно ценны в выявлении очагов значительного усиления локального мозгового кровотока — рецидивов глиальных опухолей ЦНС, что критически важно для определения дальнейшей тактики у таких пациентов.

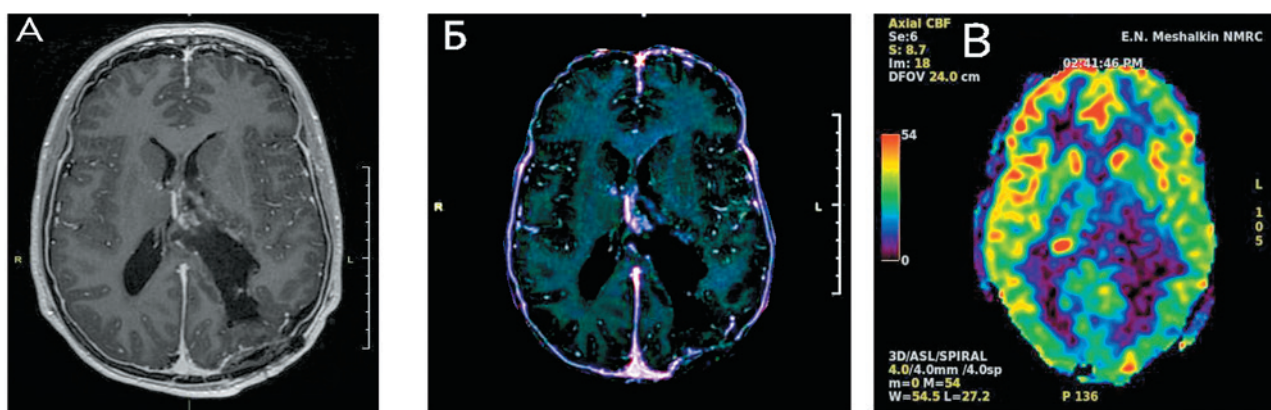


Рис. 2. Данные того же пациента, что и на рисунке 1. Исследования после нейрохирургического вмешательства — радикального удаления объемного новообразования левого бокового желудочка

Примечание: А — картина МР-томографического исследования в T1-взвешенном режиме, аксиальный срез на уровне боковых желудочков, с парамагнитным контрастным усилением (гадобутрол, 1 М раствор, 1 мл на 10 кг веса тела пациента). Узловое накопление контраста в области удаленной глиомы отсутствует, минимальное накопление парамагнетика в области прозрачной перегородки, линейное, среднеинтенсивное, расценивается как неопухолевое. Б — ОФЭКТ изображение с ^{99m}Tc -Технетрилом, аксиальный срез на уровне боковых желудочков, как и на рис. 2, А, совмещенный с МРТ в T1-ВИ на том же уровне. При сравнении с рис. 1, Б, очевидна верификация полного удаления опухолевой ткани. В — картина распределения кровотока головного мозга по данным МРТ в режиме артериальной спиновой метки на аксиальном срезе, соответствующем по расположению аксиальным срезам МРТ с контрастным усилением (рис. 2, А). Кровоток в месте ранее выявленной опухоли левого бокового желудочка в данный момент близок к фоновому, т. е. как в области непораженного белого вещества, и не имеет ни одного участка узлового повышения кровотока.

Fig. 2. The same patient as in figure 1 is examined after neurosurgical intervention — radical removal of low differentiated neoplasm of the left lateral ventricle

Notes: A is a picture of MR tomography in T1-weighted mode, axial section at the level of the lateral ventricles, with paramagnetic contrast enhancement (gadobutrol, 1 M solution at the rate of 1 ml per 10 kg of patient's body weight). There is no nodular accumulation of contrast in the area of the removed glioma, minimal paramagnetic accumulation in the area of the transparent septum, linear, medium-intensity. It is regarded as non-cancerous. B is a combined SPECT-MRI image with ^{99m}Tc -Technetrit, an axial section at the level of the lateral ventricles, as in fig. 2, A. When compared with fig. 1, B verification of complete removal of tumor tissue is obvious. B is a picture of the distribution of cerebral blood flow according to MRI data in the arterial spin tag mode on an axial section corresponding in location to the axial sections of an MRI with contrast enhancement (fig. 2, A).

Таблица. Показатели опухолевого кровотока и сосудистой проницаемости при рецидивных глиомах и при безрецидивном течении после хирургического удаления и/или стереоблационной наружной гамма-терапии. Результаты представлены как $M \pm m$, достоверность различия p — для межгруппового сравнения группы 1 и группы 2

Table. Indexes of tumor blood flow and vascular permeability in recurrent and relapse-free groups after surgical removal and/or stereoblastic external gamma therapy. The results are presented as $M \pm m$, the significance of the difference p is for the intergroup comparison of group 1 and group 2

Показатель / Index		Группа 1 Пациенты без признаков рецидива или продолженного роста глиомы (n = 11) / Group 1 Patients with no signs of recurrence or continued growth of glioma	Группа 2 Пациенты с рецидивами глиальных опухолей 2–4 ст. анаплазии (n = 12) / Group 2 Patients with recurrent glial tumors, of Grade 2–4	p — достоверность различия групп 1 и 2 (по критерию Манна-Уитни) / p — reliability of the difference between groups 1 and 2 (according to the Mann-Whitney criterion)
<i>PKpOn</i> , по данным поглощения ^{99m}Tc -Технетрила, мл/мин/100 cm^3 / as from the uptake of ^{99m}Tc -Technetрил,	Максимальное значение / Maximum value	10,48 $\pm$ 1,33	36,78 $\pm$ 4,13	0,005
	Среднее по объему патологического узла / The average over the volume of the pathological node	10,08 $\pm$ 2,9	32,98 $\pm$ 3,96	0,001
<i>PKpOn</i> , по данным МРТ в режиме АСМ, мл/мин/100 cm^3 / as from the data of the MRI in ASL mode	Максимальное значение / Maximum value	12,80 $\pm$ 1,56	41,25 $\pm$ 17,18	0,002
	Среднее по объему патологического узла / The average over the volume of the pathological node	8,5 $\pm$ 1,53	34,37 $\pm$ 5,43	0,001
$K_{\text{крово-опухоль}}$ — показатель проницаемости ГЭБ, по данным МРТ с ПМКУ, мл/мин/100 cm^3 / BBB permeability index, as from CE-MRI data	Максимальное значение / Maximum value	1,77 $\pm$ 0,44	11,32 $\pm$ 1,32	0,002
	Среднее по объему патологического узла / The average over the volume of the pathological node	1,34 $\pm$ 0,37	9,63 $\pm$ 1,06	
$\frac{K_{\text{крово-опухоль}}}{pKpOn}$, по данным МРТ в режиме АСМ / as from MRI in ASL mode	Максимальное значение / Maximum value	0,168 $\pm$ 0,014	0,274 $\pm$ 0,095	0,001
	Среднее по объему патологического узла / The average over the volume of the pathological node	0,158 $\pm$ 0,02	0,257 $\pm$ 0,028	0,005
Объем очагового поглощения ^{99m}Tc -Технетрила, cm^3 / Volume of focal uptake of ^{99m}Tc -Technetрил, cm^3		3,26 $\pm$ 0,67	15,75 $\pm$ 3,90	0,002

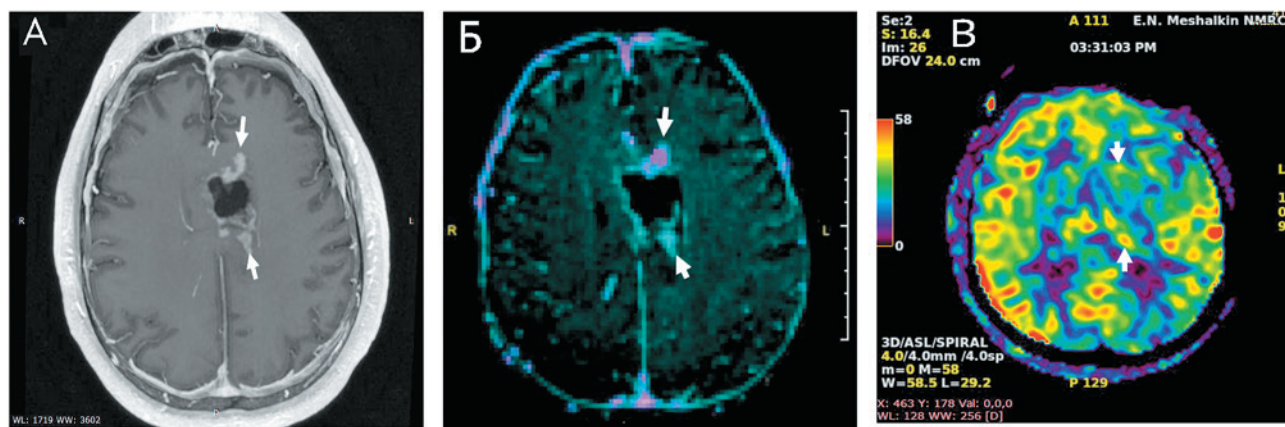


Рис. 3. Картина комплексного лучевого исследования головного мозга пациента П., ранее, за 8 мес. до настоящего исследования, радикально оперированного и затем прошедшего комплексное химиолучевое лечение по поводу низкодифференцированной глиомы левого полушария

Примечания: Непосредственно перед настоящим исследованием у данного пациента отмечалось два развернутых судорожных приступа, в связи с чем исследование, включавшее МР-томографию с парамагнитным контрастным усилением, МРТ в режиме артериальной спиновой метки, ОФЭКТ головного мозга с ^{99m}Tc -Технетрилом, как раз и было проведено. Представлены аксиальные томосрезы головного мозга на уровне послеоперационной полости — выше боковых желудочков — для МРТ с парамагнитным контрастным усилением (А), ОФЭКТ с ^{99m}Tc -Технетрилом (Б) и МРТ в режиме артериальной спиновой метки (В). В окружении и по краям послеоперационной полости хорошо можно видеть патологическое очаговое накопление контраста-парамагнетика (А) зоны патологического накопления ^{99m}Tc -Технетрила (Б) и соответствующие им по анатомическому расположению очаги патологически усиленного кровотока при исследовании в режиме АСМ.

Fig. 3. The picture of a comprehensive radiological examination of the brain of patient P., who had undergone radical surgery 8 months before the present study, and then underwent comprehensive chemoradiotherapy for low-grade glioma of the left hemisphere

Notes: Immediately before the present study, this patient had two extensive seizures, and therefore the study, which included MRI with paramagnetic contrast enhancement, MRI in arterial spin tag mode, and SPECT of the brain with ^{99m}Tc -Technetritil, was carried out. Axial tomosctions of the brain at the level of the postoperative cavity — above the lateral ventricles — are presented for MRI with paramagnetic contrast enhancement (A), SPECT CT with ^{99m}Tc -Technetritil (B) and MRI in the arterial spin labeling mode (B). Pathological focal accumulation of contrast can be clearly seen in the environment and along the edges of the postoperative cavity — paramagnetics (A) of the zone of pathological accumulation of ^{99m}Tc -Technetritil (B), and the corresponding anatomical foci of pathologically enhanced blood flow at the ASL study.

Обсуждение

Выявление случаев рецидива и продолженного роста глиальных опухолевых низкодифференцированных новообразований после их радикального нейрохирургического удаления сегодня является общепринятой и активно решаемой задачей лучевой диагностики, нейрохирургии и неврологии [1, 17, 18], в первую очередь потому, что постоянное совершенствование технологий лучевой терапии у пациентов с рецидивными опухолями позволяет в большинстве случаев достичь лучевого абляционного эффекта даже при рецидиве, но, конечно же, лишь при условии полного охвата зоной облучения всей выявленной пролиферирующей ткани опухоли [18]. Не менее важной задачей является оценка физиологического состояния опухоли — в первую очередь, ее базовых

параметров: кровотока и потребления основных метаболитов [15]. При этом крайне важно, что для опухолевых новообразований потребление глюкозы и аминокислот — с одной стороны, и кровотока — с другой, тесно взаимосвязаны [8], так что увеличенный кровоток практически всегда соответствует гиперпотреблению метаболитов [8, 15]. По многократно подтвержденным данным, потребление глюкозы доброкачественными глиально-рубцовыми процессами высокодостоверно отличается от таковых при рецидивном росте опухоли [6].

Особенности метаболизма опухолей мозга могут быть визуализированы и количественно охарактеризованы с помощью ПЭТ с широким спектром позитрон-излучающих аминокислот и нуклеотидов [6, 8]. Однако методы исследования кровотока

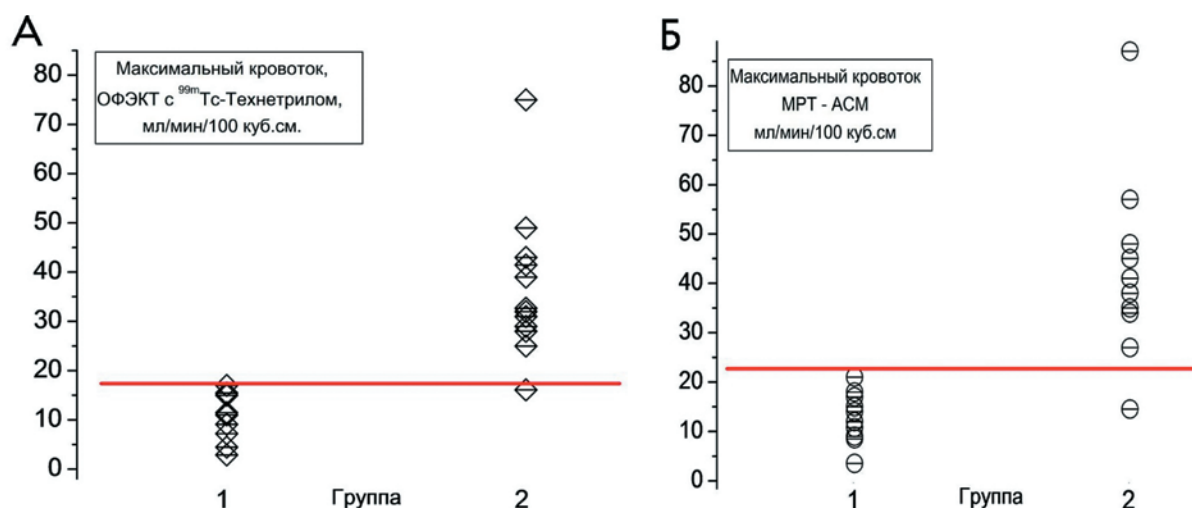


Рис. 4. Индивидуальное распределение значений показателя максимального кровотока в обследуемой области удаленной опухоли, по группам 1 и 2, при расчете по методу ОФЭКТ с ^{99m}Tc -Технетрилом (А), и с использованием МРТ с артериальной спиновой меткой (Б). Можно видеть, что величина максимального по патологической области РКрОп >25 мл/мин/100 см³ разделяет пациентов с благоприятным безрецидивным (группа 1) и рецидивным (группа 2) характером течения при использовании обоих этих методов

Fig. 4. The individual distribution of the values of the maximum blood flow index in the examined area, by groups 1 and 2, when calculated using the SPECT method with ^{99m}Tc -Technetritil (A) and using MRI with arterial spin labeling (B). It can be seen that the value of the maximum in the pathological area of tumor blood flow >25 ml/min/100 cm³ divides patients with a favorable relapse-free (group 1) and recurrent (group 2) course in cases of both these methods

новообразований головного мозга средствами МР-томографии и ОФЭКТ/КТ с гамма-радионуклидами — маркерами опухолевого кровотока, не требующими для получения медицинских циклотронов, также заслуживают более широкого рутинного использования [11, 12]. Но их практическое применение сегодня пока не соответствует потенциальным методическим возможностям. Наше исследование как раз и было направлено на возможную компенсацию этого недостатка, для случая МРТ с артериальной спиновой меткой и ОФЭКТ-КТ головного мозга с маркером опухолевого кровотока — ^{99m}Tc -Технетрилом.

Оказалось, что оба этих, методически хотя и совершенно различных, исследования дают возможность высокодостоверно разграничивать группы больных с рецидивными новообразованиями и с безрецидивным постоперационным или постлучевым течением. Более того, результаты у конкретных пациентов при обследовании МРТ-АСМ и ОФЭКТ с ^{99m}Tc -Технетрилом достоверно коррелируют, иначе говоря, эти методы практически взаимозаменяемы (рис. 5).

При этом картина семиотики частных случаев при применении того и другого метода (см. рис. 1–3) абсолютно различна, что прямо следует из их полностью различной физической сущности и принципов.

В этом смысле за ОФЭКТ в рамках цели настоящего исследования есть некоторое преимущество, поскольку фактически исследование с ^{99m}Tc -Технетрилом визуализирует сам факт опухолевого накопления радиофармпрепарата в головном мозге и таким образом при наличии аккумуляции в веществе мозга выявляет случай рецидива. Опухолевый кровоток при этом сразу оказывается высок (см. табл.), поскольку обусловлен биологическими свойствами опухоли, абсолютно отличными от нормального белого вещества мозга, и никакой «переходной зоны значений» между нормой и опухолью нет.

Как видно из таблицы, наибольшая разница между группами была по такому показателю, как максимальный кровоток в исследуемой области. Это вполне понятно патофизиологически, поскольку максимальный кровоток отражает наиболее агрессивную быстрорастущую часть опухолевого узла, вне зависимости от общего объема новообразования, который скорее определяется еще и временными факторами — периодом наблюдения после операции, доступностью метаболитов для роста [8].

С клинической точки зрения нельзя не отметить, что оба эти исследования в отношении пациента не только безвредные, но и предельно щадящие:

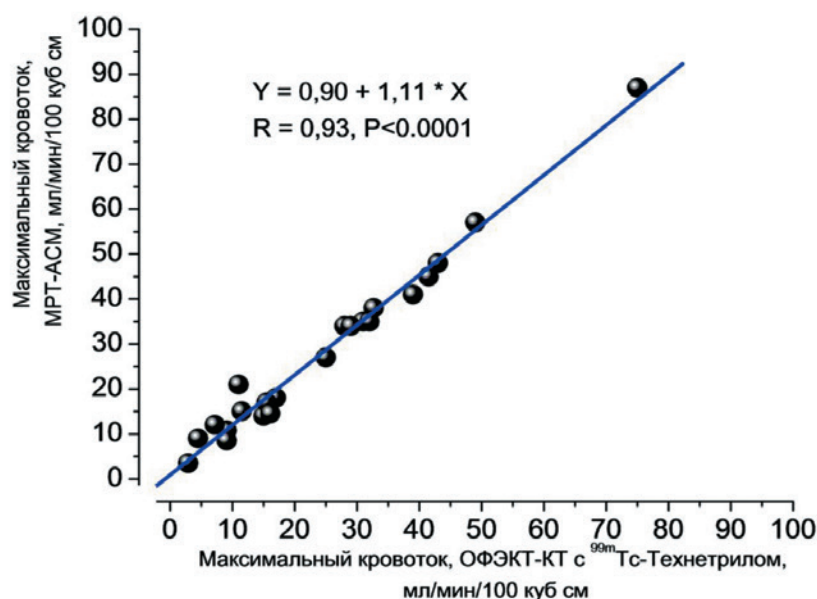


Рис. 5. Корреляционное соотношение величин опухолевого кровотока при рецидивных глиальных низкодифференцированных опухолях, по данным ОФЭКТ с ^{99m}Tc -Технетрилом и при расчете по методу артериальной спиновой метки при МРТ

Fig. 5. Correlation between the values of tumor blood flow in recurrent glial low-grade tumors, according to SPECT with ^{99m}Tc -Technetrium and calculated using the arterial spin labelling method in MRI

полностью неинвазивная МРТ-АСМ и ОФЭКТ, ограничивающаяся только введением фармакологически неощутимого радиофармпрепарата ^{99m}Tc -Технетрила. Это позволяет проводить исследования у практически любых пациентов в любом клиническом состоянии.

Сразу отметим здесь очевидные, прежде всего нам самим, недостатки нашего исследования. В первую очередь это необходимость набора в ближайшее время статистически более мощных контингентов обследуемых — по численности. Также необходимо расширение разнообразия клинических диагнозов, при которых применимы представленные здесь технологии. Далее, целесообразна полная детальная стандартизация протоколов проведения как МРТ-АСМ, так и ОФЭКТ или ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -Технетрилом. Наконец, необходимо и требуется отдельное исследование возможностей использования результатов этих методов непосредственно для планирования наружной стереотаксической лучевой терапии, учитывая, что срезы ОФЭКТ заметно толще величины 1 мм — обычной величины толщины среза, используемой в топометрических расчетах полей облучения.

Заключение

Однако уже сегодня, как следует из представленных здесь визуально-семиотических и расчетных данных МРТ в режиме АСМ, и ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -Технетрилом, эти методы обоснованно должны как можно

более широко использоваться для раннего контроля за послеоперационным состоянием у пациентов после радикального удаления глиальных низкодифференцированных опухолей головного мозга. Безусловно, целесообразно дальнейшее их сравнительное исследование в более широких клинических группах, в том числе при межцентровых исследованиях.

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы декларируют отсутствие конфликта какого-либо характера. / Authors declare absence of every kind of conflict.

Финансирование / Funding

Исследование выполнено в соответствии с Государственным заданием № 123030900018-1. / The study was carried out in accordance with the a Government assignment №123030900018-1.

Работа выполнена без дополнительной финансовой поддержки, в рамках Договора о сотрудничестве Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия, и Китайско-Российского парка науки и технологий, Чанчунь, КНР. / The work was carried out without additional financial support, within the framework of a Cooperation agreement between the Siberian branch of the RAS, Novosibirsk, Russia, and the Changchun Sino-Russian Science and Technology Park, Changchun, China.

Соответствие нормам этики / Compliance with ethical principles

Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБУ «НМИЦ им. ак. Е. Н. Мешалкина» Минздрава России (протокол от 05.09.2025) как полностью соответствующее требованиям Хельсинкского протокола и другим нормативным актам. / The study was approved by the Local Ethics Committee of the National Medical Research Center named after Academician E.N. Meshalkin of the Ministry of Health of Russia (Protocol of 05.09.2025) as entirely confident with the Protocol of Helsinki and other regulative acts.

Авторы заявляют об отсутствии использования генеративного искусственного интеллекта. / The authors declare no use of Generative AI.

Список источников / References

- Пронин И. Н., Фадеева Л. М., Подопригора А. Е. и др. Спиновое маркирование артериальной крови (ASL) — метод визуализации и оценки мозгового кровотока. *Лучевая диагностика и терапия*. 2012;3(3):64–78. <https://www.elibrary.ru/parqkl>
Pronin IN, Fadeeva LM, Podoprighora AE, et al. Spin labeling of arterial blood (ASL) is a method for visualizing and evaluating cerebral blood flow. *Radiation diagnostics and therapy*. 2012;3(3):64–78. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/parqkl>
- Шульц Е. И., Баталов А. И., Афандиев Р. М. и др. ASL-перфузия в дифференциальной диагностике опухолей боковых желудочков и прозрачной перегородки. *Радиология — практика*. 2020;4(82):16–26. <https://www.elibrary.ru/xnuunu>
Shultz EI, Batalov AI, Afandiev RM, et al. ASL perfusion in the differential diagnosis of tumors of the lateral ventricles and transparent septum. *Radiology — practice*. 2020;4(82):16–26. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/xnuunu>
- Ефимова Н. Ю., Кривоногов Н. Г., Лишманов Ю. Б., Ефимова И. Ю. Современные возможности использования радиофармпрепаратов для оценки церебрального кровотока. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2017;98(1):44–49. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2017-98-1-44-49>
Efimova NYu, Krivonogov NG, Lishmanov YuB, Efimova IYu. Current possibilities of using radiopharmaceuticals to evaluate cerebral blood flow. *Bulletin of Radiology and Radiology*. 2017;98(1):44–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2017-98-1-44-49>
- Усов В. Ю., Бабилов В. Ю., Минин С. М. и др. Количественная ОФЭКТ головного мозга с ^{99m}Tc-Технетрилом в диагностике, оценке эффективности комплексной терапии низкодифференцированных глиом и прогнозе жизни пациентов. *Российский нейрохирургический журнал имени профессора А.Л. Поленова*. 2023;15(№S1):26–27. <https://www.elibrary.ru/qgpxkz>
Ussov WYu, Babikov VYu, Minin SM, et al. Quantitative SPECT of the brain with ^{99m}Tc-Technetrit in the diagnosis, evaluation of the effectiveness of complex therapy of low-grade gliomas and life prognosis of patients. *Russian Neurosurgical Journal named after Professor A.L. Polenov*. 2023;15(№S1):26–27. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/qgpxkz>
- Усов В. Ю., Минин С. М., Сухов В. Ю. и др. Разработка метода количественного расчета тканевого и опухолевого кровотока по данным ОФЭКТ-КТ с ^{99m}Tc-Технетрилом, с использованием гамма-камер с автоматизированной оценкой локального накопления РФП в абсолютных единицах — как стандартизированной величины поглощения // Конгресс российского общества рентгенологов и радиологов: сборник тезисов, Санкт-Петербург, Россия, 08–10 ноября 2023 года. СПб: Санкт-Петербургская общественная организация «Человек и его здоровье»; 2023. С. 230–231. <https://www.elibrary.ru/noxisa>
Ussov WY, Minin SM, Soukhov VY, et al. Development of a method for quantitative calculation of tissue and tumor blood flow according to SPECT-CT with ^{99m}Tc-Technetrit, using gamma cameras with automated assessment of local accumulation of RFP in absolute units as a standardized uptake value // Congress of the Russian Society of Radiologists and Radiologists: abstracts, St. Petersburg, November 08–10, 2023. St. Petersburg: St. Petersburg Public Organization “Man and his Health”; 2023. Pp. 230–231. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/noxisa>
- Машковцев К. А., Петренева Э. А. Опыт применения ПЭТ/КТ при планировании лучевой терапии. *Уральский медицинский журнал*. 2020;2(185):34–36. <https://doi.org/10.25694/URMJ.2020.02.09>, <https://www.elibrary.ru/zttzyp>
Mashkovtsev KA, Petrenева EA. Experience in the use of PET/CT in radiation treatment planning. *Ural medical journal*. 2020;2(185):34–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.25694/URMJ.2020.02.09>, <https://www.elibrary.ru/zttzyp>
- Фатеев К. М., Терещенко Г. В., Беляев В. Н. и др. Планирование лучевой терапии на основе магнитно-резонансной томографии: первые шаги. *Вопросы гематологии, онкологии и иммунопатологии в педиатрии*. 2018;17(3):60–65. <https://doi.org/10.24287/1726-1708-2018-17-3-60-65>, <https://www.elibrary.ru/xztxmd>
Fateev KM, Tereshchenko GV, Belyaev VN, et al. Radiation treatment planning based on MRI only: first steps. *Problems of hematology, oncology and immunopathology in pediatrics*. 2018;17(3):60–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.24287/1726-1708-2018-17-3-60-65>, <https://www.elibrary.ru/xztxmd>
- Костеников Н. А., Поздняков А. В., Илющенко Ю. Р. и др. Современные технологии ядерной медицины в диагностике опухолей головного мозга. *Трансляционная медицина*. 2018;5(5):37–45. <https://www.elibrary.ru/yrrzjb>
Kostenikov NA, Pozdnyakov AV, Iliuschenko YuR, et al. Modern technologies of nuclear medicine in diagnosis of brain tumors. *Translational Medicine*. 2018;5(5):37–45. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/yrrzjb>
- Синицын В. Е., Тюрин И. Е., Шимановский Н. Л. и др. Безопасное использование контрастных средств в рентгенологии (методическое руководство Российского общества рентгенологов и радиологов). *Вестник рентгенологии*

и радиологии. 2023;104(6):363–384. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2023-104-6-363-384>, <https://www.elibrary.ru/ynqoue>

Sinityn VE, Tyurin IE, Shimanovskiy NL, et al. Safe use of contrast media in radiology (clinical guidelines). *Bulletin of Radiology and Radiology*. 2023;104(6):363–384. (In Russ.) <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2023-104-6-363-384>, <https://www.elibrary.ru/ynqoue>

10. Кармазановский Г. Г., Шимановский Н. Л. Контрастные средства для лучевой диагностики: руководство. М.: ГЭОТАР-Медиа; 2022. 672 с.

Karmazanovskiy GG, Shimanovskiy NL. Contrast agents for radiation diagnostics: guide. Moscow: GEOTAR-Media; 2022. 672 p. (In Russ.)

11. Титова В. А. Медицинские аспекты отечественных инновационных технических и технологических возможностей дистанционной и контактной лучевой терапии в онкологии: наука — практическому здравоохранению. *Трудный пациент*. 2021;19(4):60–64. <https://doi.org/10.224412/2074-1005-2021-4-60-64>, <https://www.elibrary.ru/oooutz>

Titova VA. Medical aspects of domestic innovative technical and technological capabilities of remote and contact radiation therapy in oncology: science for practical healthcare. *A Difficult Patient*. 2021;19(4):60–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.224412/2074-1005-2021-4-60-64>, <https://www.elibrary.ru/oooutz>

12. Оноприенко А. В., Костеников Н. А., Величко О. Б. и др. Использование совмещенных изображений на основе МРТ с контрастным усилением и ОФЭКТ с ^{99m}Tc -Технетрилом в диагностике злокачественных рецидивных глиом. *Медицинская визуализация*. 2004;7(5):38–46. <https://www.elibrary.ru/xaffzv>

Onoprienko AV, Kostenikov NA, Velichko OB, et al. Use of fused images combining contrast-enhanced MRI and ^{99m}Tc -MI-BI SPECT in diagnosis of recidive gliomas. *Medical Visualization*. 2004;7(5):38–46. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/xaffzv>

13. Nadeem Q, Khan I, Javed M, et al. Synthesis, characterization and bioevaluation of technetium-99m labeled N-(2-Hydroxybenzyl)-2-amino-2-deoxy-D-glucose as a tumor imaging agent. *Pakistan journal of pharmaceutical sciences*. 2013;26(2):353–357.

14. Khan I, Shahid A, Dar UK, et al. Development and bioevaluation of $^{99m}\text{Tc}(\text{CO})_3$ -labeled (1-azido-1-deoxy- β -D-glucopyranoside) complex as a potential tumor-seeking agent. *Pakistan journal of pharmaceutical sciences*. 2013;26(2):353–357.

15. Костеников Н. А., Дубровская В. Ф., Кованько Е. Г. и др. Возможности визуализации глиобластомы малого размера методом ПЭТ-КТ с ^{11}C -холином (экспериментальное исследование). *Лучевая диагностика и терапия*. 2020;11(4):30–36. <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2020-11-4-30-36>

Kostenikov NA, Dubrovskaya VF, Kovan'ko EG, et al. Possibilities of small-size glioblastoma visualization by PET-CT with ^{11}C -choline (experimental study). *Diagnostic Radiology and Radiotherapy*. 2020;11(4):30–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2020-11-4-30-36>

16. Попов В. В., Станкевич Ю. А., Богомякова О. Б., Тулупов А. А. Сравнение бесконтрастной магнитно-резонансной

перфузии и фазово-контрастной ангиографии в количественной оценке церебрального кровотока: проспективное одномоментное исследование. *Digital Diagnostics*. 2025;6(2): 203–213. <https://doi.org/10.17816/DD636690>, <https://www.elibrary.ru/mhmuyw>

Popov VV, Stankevich YuA, Bogomyakova OB, Tulupov AA. Comparison of non-contrast magnetic resonance perfusion and phase-contrast angiography for the quantitative assessment of cerebral blood flow: a prospective cross-sectional study. *Digital Diagnostics*. 2025;6(2):203–213. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/DD636690>, <https://www.elibrary.ru/mhmuyw>

17. Sollmann N, Hoffmann G, Schramm S, et al. Arterial spin labeling (ASL) in neuroradiological diagnostics — methodological overview and use cases. *RoeFo.Fortschritte auf dem Gebiet der Roentgenstrahlen und der Bildgebenden Verfahren*. 2024;196(01):36–51. <https://doi.org/10.1055/a-2119-5574>, <https://www.elibrary.ru/wyszop>

18. Lindner T, Bolar DS, Achten E, et al. On behalf of the ISMRM Perfusion Study Group. Current state and guidance on arterial spin labeling perfusion MRI in clinical neuroimaging. *Magn Reson Med*. 2024;89(5):2024–2047. <https://doi.org/10.1002/mrm.29572>

19. Кривоногов Н. Г., Минин С. М., Крылов А. Л., Лишманов Ю. Б. Сцинтиграфическое определение величины миокардиального кровотока. *Бюллетень сибирской медицины*. 2013;12(3):111–116. <https://www.elibrary.ru/qzdkuf>

Krivanogov NG, Minin SM, Krylov AL, Lishmanov YuB. Radionuclide quantitative assessment of myocardial blood flow. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2013;12(3):111–116. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/qzdkuf>

20. Cuocolo A, Petretta M, Soricelli A. Measurement of coronary flow reserve by noninvasive cardiac imaging. *European journal of nuclear medicine and molecular imaging*. 2010;37:1198–1202. <https://doi.org/10.1007/s00259-010-1401-9>

21. Усов В. Ю., Минин С. М., Никитин Н. А. и др. МР-томографическая оценка эффективности неoadъювантной химиотерапии рака молочной железы по данным вычислительного фармакокинетического анализа поглощения опухолью парамагнетиков при внутривенном контрастном усилении. *Трансляционная медицина*. 2024;11(5):428–444. <https://doi.org/10.18705/2311-4495-2024-11-5-428-444>, <https://www.elibrary.ru/erfxxc>

Ussov WYu, Minin SM, Nikitin NA, et al. MR tomographic evaluation of the effectiveness of neoadjuvant chemotherapy for breast cancer based on pharmacokinetic numerical analysis of tumor uptake of paramagnetic contrast in intravenous contrast enhancement. *Translational Medicine*. 2024;11(5):428–444. (In Russ.) <https://doi.org/10.18705/2311-4495-2024-11-5-428-444>, <https://www.elibrary.ru/erfxxc>

22. Bondareva IB, Narkevich BYa. Identification of radiopharmaceutical transport models in functional radionuclide diagnosis. *Medical Radiology*. 1991;36(5):36–39. <https://www.elibrary.ru/ksiegd>

Информация об авторах:

Усов Владимир Юрьевич — доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник отделения лучевых и инструментальных методов исследования ФГБУ «НМИЦ им. ак. Е. Н. Мешалкина» Минздрава России, Новосибирск, Россия, usov1962@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7978-5514>;

Карабанов Илья Сергеевич — аспирант научно-исследовательского отдела лучевой и инструментальной диагностики ФГБУ «НМИЦ им. ак. Е. Н. Мешалкина» Минздрава России, Новосибирск, Россия, i@karabanov99.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7947-2953>;

Минин Станислав Михайлович — кандидат медицинских наук, научный сотрудник Института онкологии и нейрохирургии, заведующий отделением радионуклидной терапии и диагностики, ФГБУ «НМИЦ им. ак. Е. Н. Мешалкина» Минздрава России, Новосибирск, Россия, minin_s@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6626-6408>;

Семин Павел Александрович — кандидат медицинских наук, заведующий отделением нейрохирургии ФГБУ «НМИЦ им. ак. Е. Н. Мешалкина» Минздрава России, Новосибирск, Россия, semin_p@meshalkin.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1576-7736>;

Анашбаев Жанат Жуманалиевич — врач-радиолог отделения радиологии ФГБУ «НМИЦ им. ак. Е. Н. Мешалкина» Минздрава России, Новосибирск, Россия, zhanatizm@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-3169-0326>;

Ли Юн-Пин — кандидат технических наук, генеральный директор Китайско-Российского парка науки и технологий, Чанчунь, КНР, crtpark@yandex.ru;

Никитин Никита Александрович — кандидат медицинских наук, врач-рентгенолог, заведующий отделением ФГБУ «НМИЦ им. ак. Е. Н. Мешалкина» Минздрава России, Новосибирск, Россия, n_nikitin@outlook.com, <http://orcid.org/0000-0001-5643-9109>;

Половников Евгений Сергеевич — кандидат медицинских наук, врач-радиотерапевт, научный сотрудник отделения радиотерапии ФГБУ «НМИЦ им. ак. Е. Н. Мешалкина» Минздрава России, Новосибирск, Россия, e_polovnikov@meshalkin.ru, <http://orcid.org/0009-0001-5531-2779>;

Тулупов Андрей Александрович — член-корреспондент РАН, профессор, доктор медицинских наук, заведующий лабораторией МРТ Технологии Международного томографического центра СО РАН, Новосибирск, Россия, taa@tomo.nsc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1277-4113>;

Шан Я-Мин (单亚明) — доктор биологических наук, научный руководитель факультета биологических наук Джилиньского университета, Чанчунь, КНР, jlulyp@sina.com, <http://orcid.org/0000-0001-8373-6088>;

Амелин Михаил Евгеньевич — кандидат медицинских наук, заведующий отделением лучевой диагностики ОГАУЗ «Новосибирская областная клиническая больница», Новосибирск, Россия, amelin_me@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5933-6479>;

Лишманов Юрий Борисович — член-корреспондент РАН, доктор медицинских наук, профессор, ведущий инженер лаборатории № 31 «НИ ядерный реактор» инженерной школы «Биомедицинские технологии» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия, lishmanovotec@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7324-504X>.

Вклад авторов:

Усов В. Ю. — разработка концепции исследования, математической модели расчета показателей кровотока при ОФЭКТ/КТ, получение первичных МРТ-изображений и их обработка. Анализ данных МРТ и ОФЭКТ/КТ на методические погрешности, статистический анализ, написание окончательного текста статьи, одобрение согласованного окончательного варианта; Карабанов И. С. — получение первичных МРТ-изображений, проведение первичных расчетов величин кровотока при МРТ-исследованиях и статистический анализ по группам, анализ корреляционных связей, написание окончательного текста и одобрение согласованного окончательного варианта; Минин С. М. — участие в разработке концепции исследования, получение первичных данных ОФЭКТ/КТ исследований, разработка математической модели обработки данных и расчета опухолевого кровотока, совместное с клиницистами разделение на группы и статистический анализ, написание текста, одобрение согласованного окончательного варианта; Тулупов А. А. — разработка концепции исследования, анализ клинического значения результатов исследований у отдельных пациентов и в целом по группам, статистический анализ групповых результатов, написание текста, одобрение согласованного окончательного варианта; Ли Юн-Пин — обработка результатов в соответствии с математическими моделями расчетов, статистический анализ групповых результатов, участие в написании окончательного текста, одобрение согласованного окончательного варианта; Анашбаев Ж. Ж. — получение первичных данных ОФЭКТ/КТ исследований, контроль качества исследований, как ОФЭКТ/КТ, так и МРТ, анализ клинической динамики состояния у пациентов и клинито-томографические сопоставления, одобрение согласованного окончательного варианта; Семин П. А. — участие в разработке концепции исследования, клиническое ведение и исследовательский анализ данных пациентов, выполнение хирургического этапа лечения и анализ его результатов по данным проспективного наблюдения, анализ клинического значения результатов исследований у отдельных пациентов и в целом по группам, одобрение согласованного окончательного варианта; Шан Я-Мин — разработка концепции исследования, анализ математических моделей в исследовании, обработка результатов ОФЭКТ/КТ, участие в написании статьи, одобрение согласованного окончательного варианта; Никитин Н. А. — получение первичных МРТ-изображений, клиническое описание и совместный анализ результатов

МРТ в режиме АСМ, анализ групповых распределений результатов и корреляционных связей, одобрение согласованного окончательного варианта; Половников Е. С. — клинический отбор пациентов, клиническое ведение их и осуществление лучевой терапии, анализ данных клиники совместно с лучевыми исследованиями — как МРТ, так и ОФЭКТ/КТ, одобрение согласованного окончательного варианта; Амелин М. Е. — получение первичных МРТ-изображений, получение данных мозгового кровотока методом артериальной спиновой метки, анализ их групповых значений и распределений, статистические расчеты, одобрение согласованного окончательного варианта; Лишманов Ю. Б. — участие в разработке концепции исследования, обработка и клинический анализ результатов ОФЭКТ/КТ, совместный анализ данных МРТ и ОФЭКТ/КТ, написание статьи и ее редактирование, одобрение согласованного окончательного варианта.

Authors information:

Wladimir Yu. Usov, MD, DSc, Professor, Chief researcher at the department of radiation and instrumental research methods of the Federal state budgetary institution “National medical research center named after academician E.N. Meshalkin” of the Ministry of health of the Russian Federation, Novosibirsk, Russia, ussov1962@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7978-5514>;

Ilya S. Karabanov, Postgraduate Student of the scientific research department of radiation and instrumental diagnostics of the Federal state budgetary institution “National medical research center named after academician E.N. Meshalkin” of the Ministry of health of the Russian Federation, Novosibirsk, Russia, i@karabanov99.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7947-2953>;

Stanislav M. Minin, MD, PhD, Researcher at the research department of oncology and radiotherapy at the Institute of oncology and neurosurgery, the scientific research department of radiation and instrumental diagnostics of the Federal state budgetary institution “National medical research center named after academician E.N. Meshalkin” of the Ministry of health of the Russian Federation, Novosibirsk, Russia, minin_s@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6626-6408>;

Pavel A. Semin, MD, PhD, Head of the department of neurosurgery of the Federal state budgetary institution “National medical research center named after academician E.N. Meshalkin” of the Ministry of health of the Russian Federation, Novosibirsk, Russia, semin_p@meshalkin.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1576-7736>;

Zhanat Zh. Anashbaev, Radiologist, Department of radiology of the Federal state budgetary institution “National medical research center named after academician E.N. Meshalkin”, Ministry of health of the Russian Federation, Novosibirsk, Russia, zhanatizm@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-3169-0326>;

Li Yongping (李永平), PhD in Technical Sciences, General Director of Changchun Sino-Russian Science and Technolo-

gy Park, Changchun, China, crtspark@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9170-0448>;

Nikita A. Nikitin, MD, PhD, Head of the department of radiology, radiologist, department of radiology, Federal state budgetary institution “National medical research center named after academician E.N. Meshalkin”, Ministry of health of the Russian Federation, Novosibirsk, Russia, n_nikitin@outlook.com, <http://orcid.org/0000-0001-5643-9109>;

Evgenii S. Polovnikov, MD, PhD, Radiologist, Researcher at the department of radiotherapy of the Federal state budgetary institution “National medical research center named after academician E.N. Meshalkin” of the Ministry of health of the Russian Federation, Novosibirsk, Russia, e_polovnikov@meshalkin.ru, <http://orcid.org/0009-0001-5531-2779>;

Andrey A. Tulupov, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Professor, MD, DSc, Head of the laboratory of MRI Technology of the International tomographic center of Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, SB RAS, Novosibirsk, taa@tomo.nsc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1277-4113>;

Shan Yaming (单亚明), DSc in Biological Sciences, Scientific Director of the Faculty of Biological Sciences, Jilin University, Changchun, China. e-mail: jlulyp@sina.com, <http://orcid.org/0000-0001-8373-6088>;

Mikhail E. Amelin, MD, PhD, head of the department of radiation diagnostics, Novosibirsk regional clinical hospital, Novosibirsk, Russia, amelin_me@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5933-6479>;

Yuri B. Lishmanov, MD, DSc, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, leading engineer of laboratory No.31 of the Research nuclear reactor of the “Biomedical Engineering” School of Tomsk Polytechnic University, lishmanovotec@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7324-504X>.

Contribution of the authors:

Usov W. Yu. — development of a research concept, a mathematical model for calculating blood flow parameters during SPECT/CT, obtaining primary MRI images and their processing. Analysis of MRI and SPECT data/CT for methodological errors, statistical analysis, writing of the final text of the article, approval of the agreed final version; Karabanov I. S. — obtaining primary MRI images, conducting initial calculations of blood flow values during MRI examinations and statistical analysis by groups, analyzing correlations, writing the final text and approving the agreed final version; Minin S. M. — participation in the development of the research concept, obtaining primary SPECT data/CT research, development of a mathematical model for data processing and calculation of tumor blood flow, joint division into groups and statistical analysis with clinicians, non—writing of the text, approval of the agreed final version; Tulupov A. A. — development of the research concept, analysis of the clinical significance of research results in individual patients and in groups as a whole, statistical analysis of group results, writing of the text, approval of the agreed final version;

Lee Yun-Ping — processing of results in accordance with mathematical calculation models, statistical analysis of group results, participation in writing the final text, approval of the agreed final version by; Anashbayev J. J. — obtaining primary SPECT data/CT research, quality control of research, such as SPECT/CT and MRI, analysis of the clinical dynamics of the condition in patients and clinical tomographic comparisons, approval of the agreed final version; Semin P. A. — participation in the development of the research concept, clinical management and research analysis of patient data, implementation of the surgical stage of treatment and analysis of its results based on prospective observation data, analysis of the clinical significance of research results in individual patients and in groups as a whole, approval of the agreed final version; Shang Ya-Ming — development of the research concept, analysis of mathematical models in research, processing of SPECT results/CT, participation in writing the article, approval of the agreed final version; Nikitin N. A. — obtaining primary MRI images, clinical description and joint analysis of MRI results in

AFM mode, analysis of group distributions of results and correlations. approval of the agreed final version; Polovnikov E. S. — clinical selection of patients, clinical management and implementation of radiation therapy, analysis of clinic data in conjunction with radiation examinations — both MRI and SPECT/CT, approval of the agreed final version; Amelin M. E. — obtaining primary MRI images, obtaining cerebral blood flow data by arterial spin tag method, analyzing their group values and distributions, statistical calculations, approval of the agreed final version; Lishmanov Yu. B. — participation in the development of the research concept, processing and clinical analysis of SPECT results/CT, joint analysis of MRI and SPECT data/CT, writing and editing of the article, approval of the agreed final version.

Поступила в редакцию / Received: 29.11.2025

Принята к публикации / Accepted: 12.03.2026
