



Применение позитронно-эмиссионной и компьютерной томографии (ПЭТ-КТ) с ^{11}C -L-метионином в диагностике опухолей глиального ряда

**Толиджи А.З.¹, Зыков Е.М.², Семенова А.Р.³, Аксенова С.П.^{1,3},
Нуднов Н.В.^{1,3,4}, Подольская М.В.¹**

¹ ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы»,
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198, Российская Федерация

² ГБУЗ «Санкт-Петербургский клинический научно-практический центр специализированных видов медицинской помощи (онкологический) им. Н.П. Напалкова»,
ул. Ленинградская, 68А, лит. А, пос. Песочный, Санкт-Петербург, 197758, Российская Федерация

³ ФГБУ «Российский научный центр рентгенорадиологии» Минздрава России,
ул. Профсоюзная, 86, Москва, 117997, Российская Федерация

⁴ ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России,
ул. Баррикадная, 2/1, стр. 1, Москва, 125993, Российская Федерация

Толиджи Анжело Зохиалан, клинический ординатор по специальности «радиология» кафедры онкологии и рентгенорадиологии им. В.П. Харченко Медицинского института ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы»;
<https://orcid.org/0009-0003-8453-2329>

Зыков Евгений Михайлович, к. м. н., врач-рентгенолог, заведующий лабораторией изотопных исследований ГБУЗ «Санкт-Петербургский клинический научно-практический центр специализированных видов медицинской помощи (онкологический) им. Н.П. Напалкова»;
<https://orcid.org/0000-0001-6034-2457>

Семенова Ангелина Романовна, клинический ординатор по специальности «рентгенология» ФГБУ «Российский научный центр рентгенорадиологии» Минздрава России;
<https://orcid.org/0000-0001-7318-4216>

Аксенова Светлана Павловна, к. м. н., науч. сотр. лаборатории рентгенорадиологии научно-исследовательского отдела комплексной диагностики заболеваний и радиотерапии ФГБУ «Российский научный центр рентгенорадиологии» Минздрава России, доцент кафедры онкологии и рентгенологии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы»;
<https://orcid.org/0000-0003-2552-5754>

Нуднов Николай Васильевич, д. м. н., профессор, зам. директора по научной работе, профессор кафедры онкологии и рентгенорадиологии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы», зам. директора по научной работе, заведующий научно-исследовательским отделом комплексной диагностики заболеваний и радиотерапии ФГБУ «Российский научный центр рентгенорадиологии» Минздрава России, профессор кафедры рентгенологии и радиологии ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России;
<http://orcid.org/0000-0001-5994-0468>

Подольская Мария Владимировна, к. м. н., доцент кафедры онкологии и рентгенорадиологии им. В.П. Харченко Медицинского института ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы»;
<https://orcid.org/0000-0003-0453-6956>

Резюме

Актуальность. К первичным опухолевым поражениям головного мозга относят глиомы, которые, по эпидемиологическим данным, составляют около 30% всех опухолей центральной нервной системы и являются наиболее распространенными. Показатели общей и безрецидивной выживаемости зависят от степени злокачественности глиомы и гистопатологического характера обнаруженного поражения. Для определения прогноза и выбора оптимальной тактики лечения необходимо определить точное расположение и патоморфологические характеристики опухоли. Магнитно-резонансная томография (МРТ) остается методом выбора для структурной оценки головного мозга, однако даже с применением контрастного усиления (КУ) она не всегда позволяет достоверно дифференцировать прогрессирование опухоли и посттерапевтические изменения (радионекроз, послеоперационные рубцы, кисты, воспаление) у пациентов после проведенного противоопухолевого лечения. Радиофармацевтические препараты, в частности ^{11}C -L-метионин, обеспечивают оценку аминокислотного метаболизма опухоли и дополняют структурные данные, повышая точность диагностики. МРТ, позитронно-эмиссионная и компьютерная томография (ПЭТ-КТ) с ^{11}C -L-метионином в сочетании с морфологическим исследованием образца после стереотаксической биопсии показали высокую эффективность в диагностике глиом различной степени злокачественности.

Цель: изучить возможности применения ПЭТ-КТ с ^{11}C -L-метионином в диагностике продолженного роста и рецидива опухолей глиального ряда, а также провести дифференциальную диагностику с постоперационными неопухолевыми изменениями.

Материал и методы. Ретроспективное описательное аналитическое исследование проведено в отделении радионуклидной терапии и диагностики ГБУЗ «Санкт-Петербургский клинический научно-практический центр специализированных видов медицинской помощи (онкологический) им. Н.П. Напалкова». В него включены 67 пациентов (34 мужчины и 33 женщины в возрасте от 17 до 75 лет, средний возраст $43,5 \pm 15,6$ года), которым выполнена ПЭТ-КТ в период с 2007 по 2015 гг. после проведенного нейрохирургического лечения с подозрением на продолженный рост глиальных опухолей. Всем больным выполняли МРТ и КТ с КУ. Для оценки уровня зависимости между данными ПЭТ-КТ использовали коэффициент корреляции (r).

Результаты. В 55% наблюдений определялся продолженный рост глиом высокой степени злокачественности (III и IV степени). У таких пациентов индекс накопления радиофармпрепарата колебался в диапазоне $1,3 - 5,1$ при среднем значении $2,9 \pm 0,85$. У больных с продолженным ростом доброкачественных астроцитом степень накопления ^{11}C -L-метионина варьировалась при среднем значении $1,6 \pm 0,51$. Чувствительность и специфичность ПЭТ-КТ в выявлении прогрессирования глиом головного мозга составили 92,3% и 73,3% соответственно. Сочетание МРТ с КУ и ПЭТ-КТ обеспечило чувствительность 96,1% в диагностике прогрессирования глиальной опухоли. Результаты показывают, что данные МРТ и ПЭТ-КТ согласуются между собой в 45 из 48 случаев (92,8%) доказанного прогрессирования глиомы. При индексе накопления, превышающем 2, можно предположить непрерывный злокачественный рост глиальной опухоли с точностью 95%, и порог дифференциации доброкачественной глиомы от воспалительного поражения составляет 0,9.

Заключение. Хотя ПЭТ-КТ обладает хорошей чувствительностью в дифференциации послеоперационных поражений у пациентов с глиомой, проведение МРТ с КУ необходимо для топической и более ранней диагностики. Отсутствие визуализации аваскулярных глиом является одним из недостатков ПЭТ-КТ, хотя МРТ с КУ не исключает их.

Ключевые слова: глиома; позитронно-эмиссионная и компьютерная томография с ^{11}C -L-метионином; продолженный рост; пороговые значения индекса накопления, степень злокачественности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Толиджи А.З., Зыков Е.М., Семенова А.Р., Аксенова С.П., Нуднов Н.В., Подольская М.В. Применение позитронно-эмиссионной и компьютерной томографии (ПЭТ-КТ) с ^{11}C -L-метионином в диагностике опухолей глиального ряда. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2025; 106(5): 152–162. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2025-106-5-152-162>

Для корреспонденции: Аксенова Светлана Павловна, e-mail: fabella@mail.ru

Статья поступила 14.10.2025

После доработки 08.11.2025

Принята к печати 17.11.2025

The Use of Positron Emission Tomography and Computed Tomography (PET-CT) with ^{11}C -L-Methionine in the Diagnosis of Glial Tumors

Angelo Z. Toligi¹, Evgeny M. Zykov², Angelina R. Semenova³, Svetlana P. Aksenova^{1,3}, Nikolay V. Nudnov^{1,3,4}, Maria V. Podolskaya¹

¹ Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, ul. Miklukho-Maklaya, 6, Moscow, 117198, Russian Federation

² Saint Petersburg Clinical Scientific and Practical Center for Specialized Types of Medical Care (Oncological) named after N. P. Napalkov, ul. Leningradskaya, 68A, lit. A, Pesochny Settlement, Saint Petersburg, 197758, Russian Federation

³ Russian Scientific Center of Roentgenoradiology, ul. Profsoyuznaya, 86, Moscow, 117997, Russian Federation

⁴ Russian Medical Academy of Continuing Professional Education, ul. Barrikadnaya, 2/1, str. 1, Moscow, 125993, Russian Federation

Angelo Z. Toligi, Clinical Resident in Radiology, Chair of Oncology and Radiology named after V.P. Kharchenko, Medical Institute, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba; <https://orcid.org/0009-0003-8453-2329>

Evgeny M. Zykov, Cand. Med. Sc., Radiologist, Head of Isotope Research Laboratory, Saint Petersburg Clinical Scientific and Practical Center for Specialized Types of Medical Care (Oncological) named after N. P. Napalkov; <https://orcid.org/0000-0001-6034-2457>

Angelina R. Semenova, Clinical Resident in Radiology, Russian Scientific Center of Roentgenoradiology; <https://orcid.org/0000-0001-7318-4216>

Svetlana P. Aksenova, Cand. Med. Sc., Researcher, X-ray Radiology Laboratory, Research Department of Complex Diagnostics of Diseases and Radiotherapy, Russian Scientific Center of Roentgenoradiology; Associate Professor, Chair of Oncology and Radiology, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba; <https://orcid.org/0000-0003-2552-5754>

Nikolay V. Nudnov, Dr. Med. Sc., Professor, Deputy Director for Scientific Work, Professor, Chair of Oncology and Roentgenology, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba; Deputy Director for Scientific Work, Head of Research Department of Complex Diagnostics of Diseases and Radiotherapy, Russian Scientific Center of Roentgenoradiology; Professor, Chair of Radiology and Nuclear Medicine, Russian Medical Academy of Continuing Professional Education; <http://orcid.org/0000-0001-5994-0468>

Maria V. Podolskaya, Cand. Med. Sc., Associate Professor, Chair of Oncology and Radiology named after V.P. Kharchenko, Medical Institute, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba; <https://orcid.org/0000-0003-0453-6956>

Abstract

Background. Primary brain tumor lesions include gliomas, which, according to epidemiological data, make up about 30% of all tumors of the central nervous system and are the most common. Overall and relapse-free survival rates depend on the degree of glioma malignancy and the histopathological nature of the detected lesion. For better treatment and prognosis, it is necessary to determine the exact location and histopathological nature of the tumor. Magnetic resonance imaging (MRI) remains the method of choice for structural brain assessment, but even with the use of contrast enhancement (CE), it does not always allow for reliable differentiation between tumor progression and post-therapeutic changes (radionecrosis, postoperative scars, cysts, inflammation) in patients after antitumor treatment. Radiopharmaceuticals, in particular ^{11}C -L-methionine, provide an assessment of tumor amino acid metabolism and complement structural data, increasing diagnostic accuracy. MRI, positron emission tomography and computed tomography (PET-CT) with ^{11}C -L-methionine in combination with morphological examination of the sample after stereotactic biopsy have shown high efficiency in the diagnosis of gliomas with varying degrees of malignancy.

Objective: to study the possibilities of applying PET-CT with ^{11}C -L-methionine in the diagnosis of continued growth and recurrence of glial tumors, as well as to conduct differential diagnostics with postoperative non-neoplastic changes.

Material and methods. A retrospective, descriptive, analytical study was conducted in the Department of Radionuclide Therapy and Diagnostics of the Saint Petersburg Clinical Scientific and Practical Center for Specialized Types of Medical Care (Oncological) named after N.P. Napalkov. It included 67 patients (34 men and 33 women aged 17 to 75 years, mean age was 43.5 ± 15.6 years) for whom PET-CT was carried out in the period from 2007 to 2015 after neurosurgical treatment with suspected continued growth of glial tumors. All patients underwent CE-MRI and CE-CT. Correlation coefficient (r) was used to estimate the level of dependence between PET-CT data.

Results. In 55% of the cases, continued growth of high-grade gliomas (Grades IV and III) was detected. In these patients, the radiopharmaceutical accumulation index ranged from 1.3 to 5.1, with mean value 2.9 ± 0.85 . In patients with continued growth of benign astrocytomas, the degree of ^{11}C -L-methionine accumulation varied with mean value 1.6 ± 0.51 . The sensitivity and specificity of PET-CT in detecting brain glioma progression were 92.3% and 73.3%, respectively. The combination of CE-MRI and PET-CT provided a sensitivity of 96.1% in diagnosing glioma tumor progression. The results show that MRI and PET-CT data are consistent in 45 of 48 cases (92.8%) of proven glioma progression. An accumulation index greater than 2 can predict continuous growth of malignant glioma with 95% accuracy, and the threshold for differentiating benign glioma from inflammatory lesions is 0.9.

Conclusion. Although PET-CT has good sensitivity in differentiating postoperative lesions in patients with glioma, CE-MRI is necessary for localized and earlier diagnosis. The lack of visualization of avascular gliomas is one of the limitations of PET-CT, although CE-MRI does not exclude them.

Keywords: glioma; positron emission tomography and computed tomography with ^{11}C -L-methionine; continued growth; threshold values of accumulation index; degree of malignancy.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

For citation: Toligi AZ, Zikov EM, Semenova AR, Aksenova SP, Nudnov NV, Podolskaya MV. The use of positron emission tomography and computed tomography (PET-CT) with ^{11}C -L-methionine in the diagnosis of glial tumors. *Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2025; 106(5): 152–162 (in Russian). <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2025-106-5-152-162>

For corresponding: Svetlana P. Aksenova, e-mail: fabella@mail.ru

Received October 14, 2025

Revised November 8, 2025

Accepted November 17, 2025

Введение / Introduction

В онкологической практике опухоли центральной нервной системы (ЦНС) остаются актуальной проблемой современного здравоохранения, несмотря на успехи в их диагностике и лечении. Показатели заболеваемости в развитых странах различаются. По национальным данным, опубликованным в России, она составляла 5,06 случая на 100 тыс. населения в 2011 г., 6,08 в 2015 г. и 5,64 в 2021 г. [1]. В США заболеваемость опухолями ЦНС достигает 8,2 случая на 100 тыс. [2], а во Франции оценивается в 5,6 случая на 100 тыс. человек в год [3]. Важно отметить, что эти опухоли связаны с высоким уровнем инвалидизации, летальности, а также с социально-экономическими трудностями [4].

Опухоли ЦНС представляют собой гетерогенную нозологическую группу, включающую опухоли из глиальных клеток. По данным О.И. Кита и др. (2021 г.), глиомы составляют не менее 30% всех опухолей ЦНС [5]. Для определения прогноза и выбора оптимальной тактики лечения необходимо знать точное расположение и гистологический характер поражения. Магнитно-резонансная томография (МРТ), позитронно-эмиссионная и компьютерная томография (ПЭТ-КТ) с ^{11}C -L-метионином в сочетании с патоморфологическим исследованием образца после стереотаксической биопсии доказали свою высокую диагностическую значимость [6, 7].

Несмотря на то что МРТ остается методом выбора в диагностике опухолевой патологии головного мозга, она не позволяет достоверно дифференцировать поражение в зависимости от степени злокачественности, даже с использованием контрастного усиления [8]. Таким образом, наша работа направлена на оценку возможности применения ПЭТ-КТ с ^{11}C -L-метионином для дифференциальной диагностики глиом различной степени злокачественности.

Цель – определить диагностическую информативность метода ПЭТ-КТ с ^{11}C -L-метионином в диагностике продолженного роста и рецидива опухолей глиального ряда, а также провести дифференциальную диагностику с постоперационными неопухолевыми изменениями.

Материал и методы / Material and methods

Исследование проведено в отделении радионуклидной терапии и диагностики ГБУЗ «Санкт-Петербургский клинический научно-практический центр специализированных видов медицинской помощи (онкологический) им. Н.П. Напалкова». С 2007 по 2015 гг. обследованы 67 пациентов, направленных на ПЭТ-КТ с подозрением на продолженный рост глиальных опухолей. Во всех случаях диагноз глиальной опухоли

головного мозга был подтвержден морфологическим исследованием.

Критерии включения: пациенты с гистологически подтвержденной опухолью глиального ряда, которым выполнены хирургическое лечение и лучевая терапия, наличие МРТ-исследования головного мозга, ПЭТ-КТ с ^{11}C -L-метионином. Критерии невключения: отсутствие подтверждения гистологического типа опухоли головного мозга и пациенты, у которых размер очагов поражения на МРТ и КТ составил менее 1 см.

ПЭТ-КТ с ^{11}C -L-метионином у пациентов с глиомами проводили через 3–4 мес после хирургического вмешательства. Больных обычно осматривали через 3–4 нед после операции. Для выявления зоны поражения им выполняли МРТ и КТ с контрастным усилением.

В исследовании использовали позитронно-эмиссионный томограф General Electric Discovery 69 (США). В 2009 г. он производился в сочетании с программным обеспечением Khxar30.V40. Радиофармацевтический препарат (РФП) ^{11}C -L-метионин синтезировали в соответствии с методом D. Comar et al. (1976 г.) [9]. Объемная активность 600–800 МБк/мл получена на общую продолжительность синтеза 40 мин.

Интерес использования ^{11}C -L-метионина заключается в гиперметаболизме аминокислот злокачественными опухолевыми клетками мозга. Через 5 мин после введения данного РФП его концентрация в крови уменьшается в 7–8 раз по сравнению с начальной. Физиологическое накопление ^{11}C -L-метионина наблюдается в коре головного мозга и глубоких структурах (базальные ядра, таламус), где составляет около 1–2%.

ПЭТ-КТ выполняли в три этапа: введение РФП, двухэтапное сканирование (идентификация подозрительной области и последующая коррекция затухания излучения) и оцифровка излучения. Позиционирование пациента стало возможным благодаря лазерному оптическому центрирующему устройству. Для выбора области сканирования предварительную маркировку не проводили, данные реконструировали после регистрации излучения РФП.

Полученные изображения подвергали качественной и количественной оценке. Для качественного анализа интенсивности накопления РФП в зоне поражения (местоположение, размер, контуры и распределение) использовали цветовую шкалу. Собранные данные сопоставляли с результатами МРТ и КТ. В случае изображений, которые нелегко идентифицировать с помощью ПЭТ-КТ, зону интереса (region of interest, ROI) выбирали, используя данные МРТ и КТ. Они регистрируются и накладываются вручную или в электронном виде на изображение ПЭТ.

В количественном отношении рассчитывали индекс накопления ^{11}C -L-метионина (Мет-ИН), который представляет собой отношение максимального значения радиоактивности пораженной части к коэффициенту неизменной контралатеральной коры. Для этого выбирали две ROI одинакового размера: над наиболее активной областью опухоли (с использованием изоконтур) и неизменной контралатеральной зоной.

Через 10 мин после внутривенной инъекции 1,5–2,5 мл ^{11}C -L-метионина, содержащего дозу 370–640 МБк (300 МБк/м²) каждому пациенту проводили ПЭТ-КТ. Эффективную дозу рассчитали на уровне 0,0074 мЗв/МБк и от 2,7 до 4,7 мЗв в зависимости от поверхности тела. На ПЭТ-КТ в норме визуализируются такие структуры, как гипофиз, слюнные, слезные и околоушные железы, носоглоточные миндалины и апоневроз.

Изучили несколько переменных. Зависимой переменной является Мет-ИН, независимыми – возраст, пол, гистологический подтип опухоли, степень злокачественности (по шкале Всемирной организации здравоохранения), характеристики опухоли (местоположение, размер, контуры) и распределение ^{11}C -L-метионина.

Для обработки собранных данных использовали статистическое программное обеспечение Statistica for Windows (StatSoft Inc. США). Рассчитывали средние значения со стандартным отклонением ($M \pm \sigma$). Применяли непараметрический U-критерий Манна–Уитни для оценки различий между двумя независимыми выборками по уровню признака, измеренного количественно. Разницу считали значимой при значении $p < 0,05$. Данные, полученные до и после лечения, сопоставляли между собой с помощью критерия Вилкоксона. Коэффициент корреляции (r) использовали для оценки уровня зависимости между данными ПЭТ-КТ. Значения чувствительности, специфичности и диагностической точности определяли следующим образом:

$$\text{Чувствительность (\%)} = \text{ИП} / (\text{ИП} + \text{ЛО}) \times 100,$$

$$\text{Специфичность (\%)} = \text{ИО} / (\text{ИО} + \text{ЛП}) \times 100,$$

$$\text{Точность (\%)} = (\text{ИП} + \text{ИО}) / (\text{ИП} + \text{ИО} + \text{ЛО} + \text{ЛП}) \times 100,$$

где ИП – истинно положительные результаты; ИО – истинно отрицательные результаты; ЛП – ложноположительные результаты; ЛО – ложноотрицательные результаты.

Результаты / Results

Характеристики пациентов

Среди обследованных пациентов было 34 мужчины и 33 женщины в возрасте от 17 до 75 лет. Средний возраст составил $43,5 \pm 15,6$ года.

Распределение пациентов по гистологическому диагнозу представлено на рисунке 1. В 55% случаев продолженный рост отмечен в глиомах высокой степени злокачественности (III, IV степени).

Количественный анализ ПЭТ-КТ

В группе пациентов со злокачественным ростом опухоли (III и IV степени) Мет-ИН колебался между 1,3 и 5,1 при среднем значении $2,9 \pm 0,85$. У больных с продолженным ростом астроцитом низкой степени злокачественности этот показатель варьировался от 0,5 до 2,0 при среднем значении $1,6 \pm 0,45$ (табл. 1).

ПЭТ-КТ в диагностике и дифференциальной диагностике глиом и неопухолевых поражений головного мозга

Из таблиц 2, 3 видно, что гиперметаболизм аминокислот наблюдался во всех случаях продолженного роста злокачественных глиом (ПРЗГ) и являлся их основным (прямым) признаком. Контуры опухолевого очага при ПРЗГ в большинстве случаев оказались нечеткими и, как правило, неровными, а распределение РФП – неоднородным (косвенные признаки). Однако в 6–36% случаев указанные косвенные признаки отсутствовали.

Следует отметить, что гиперметаболизм наблюдается в 73,3% случаев продолженного роста доброкачественных астроцитом (ПРДА). Сравнение с гистологическими исследованиями показало, что 2 из 4 (50%) доброкачественные опухоли, которые не были визуализированы, являлись гиповаскулярными гипо- и аметаболическими олигоастроцитомами (I степень), в то время как гипervasкулярные олигодендроглиомы (II степень) были гиперметаболическими (11 из 15). Гиперметаболические астроцитомы имеют в 81,8% случа-

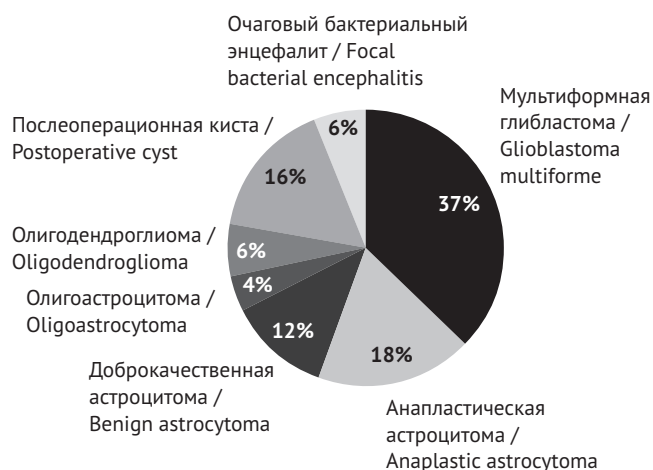


Рис. 1. Распределение пациентов по гистологическому диагнозу

Fig. 1. Patient distribution by histological diagnosis

Таблица 1

Индексы накопления ^{11}C -L-метионина (Мет-ИН), полученные при позитронно-эмиссионной томографии в группе больных с продолженным ростом глиом и неопухолевых поражений головного мозга (n=67)

Table 1

Accumulation indices of ^{11}C -L-methionine (Met-AI) determined by positron emission tomography in patients with continued glial growth and non-cancerous brain lesions (n=67)

Нозологическая форма / Nosological form	Число пациентов, n (%) / Number of patients, n(%)	Мет-ИН / Met-AI
Продолженный рост злокачественных глиом (III–IV степени) / Continued glial growth (Grade III–IV)	37 (55,2)	1,3–5,1 (2,9±0,85)
Продолженный рост доброкачественной астроцитомы / Continued growth of benign astrocytoma	15 (22,4)	0,5–2,0 (1,6±0,45)
Послеоперационная киста / Postoperative cyst	11 (16,4)	0,4–0,9 (0,55±0,17)
Очаговый бактериальный энцефалит / Focal bacterial encephalitis	4 (6,0)	1,6–2,8 (1,9±0,56)

Таблица 2

Визуальные признаки продолженного роста злокачественных глиом, доброкачественных астроцитом и неопухолевых очаговых поражений головного мозга, определяемые при позитронно-эмиссионной томографии с ^{11}C -L-метионином (n=67), n (%)

Table 2

Visual signs of continued growth of malignant glioma, benign astrocytes and non-cancerous focal brain lesions determined by positron emission tomography with ^{11}C -L-methionine (n=67), n (%)

Признак / Sign	ДА / ВА (n=15)	ПК / РС (n=11)	ОБЭ / FBE (n=4)	МГБ / GBM (n=25)	АА / АА (n=12)
Гиперметаболизм / Hypermetabolism	11 (73,3)	0 (0,0)	4 (100,0)	25 (100,0)	12 (100,0)
Изометаболизм / Isometabolism	2 (13,3)	2 (18,2)	0 (0,0)	0 (0,0)	0 (0,0)
Гипометаболизм / Hypometabolism	2 (13,3)	9 (81,8)	0 (0,0)	0 (0,0)	0 (0,0)
Контур очага / Tumor site contour					
четкие / clear	2 (13,3)	6 (54,5)	2 (100,0)	12 (48,0)	3 (25,0)
нечеткие / unclear	9 (81,8)	5 (45,5)	0 (0,0)	13 (52,0)	9 (75,0)
ровные / regular	0 (0,0)	0 (0,0)	0 (0,0)	1 (4,0)	1 (8,4)
неровные / irregular	11 (100,0)	11 (100,0)	2 (100,0)	24 (96,0)	11 (91,6)
Распределение РФП в очаге / RPh distribution in the focus					
однородное / homogeneous	1 (9,1)	10 (91,0)	2 (100,0)	6 (24,0)	1 (8,4)
неоднородное / heterogeneous	10 (90,9)	1 (9,0)	0 (0,0)	19 (76,0)	11 (91,6)

Примечание. РФП – радиофармпрепарат; ДА – доброкачественная астроцитомы; ПК – послеоперационная киста; ОБЭ – очаговый бактериальный энцефалит; МГБ – мультиформная глиобластома; АА – анапластическая астроцитомы.

Note. RPh – radiopharmaceutical; BA – benign astrocytoma; PC – postoperative cyst; FBE – focal bacterial encephalitis; GBM – glioblastoma multiforme; AA – anaplastic astrocytoma.

ев нечеткие и в 100% случаев неровные контуры. В большинстве (90,9%) случаев доброкачественных астроцитом распределение РФП было неоднородным (косвенные признаки). Визуализация ПРДА, полученная с помощью ПЭТ-КТ, напрямую

зависела от степени злокачественности, но 26,6% аваскулярных глиом не было обнаружено.

В большинстве случаев (81,8%) послеоперационные кисты (ПК) являются гипометаболическими (прямой признак), имеют четкий (54,5%) и не-

Визуальные признаки продолженного роста злокачественных глиом головного мозга, полученные при позитронно-эмиссионной томографии с ^{11}C -L-метионином, в зависимости от размера глиом (n=37), n (%)

Table 3

Visual signs of continued growth of brain malignant gliomas determined by positron emission tomography with ^{11}C -L-methionine, depending on glioma size (n=37), n (%)

Признак / Sign	<2 см / <2 cm (n=2)	2–5 см / 2–5 cm (n=19)	>5 см / >5 cm (n=16)
Гиперметаболизм / Hypermetabolism	2 (100,0)	19 (100,0)	5 (100,0)
Изометаболизм / Isometabolism	0 (0,0)	0 (0,0)	0 (0,0)
Гипометаболизм / Hypometabolism	0 (0,0)	0 (0,0)	0 (0,0)
Контур очага / Tumor site contour			
четкие / clear	1 (50,0)	13 (68,4)	1 (6,3)
нечеткие / unclear	1 (50,0)	5 (26,3)	15 (93,8)
ровные / regular	0 (0,0)	1 (5,2)	1 (6,3)
неровные (irregular)	2 (100,0)	18 (94,7)	15 (93,8)
Распределение РФП в очаге / RPh distribution in the focus			
однородное / homogeneous	2 (100,0)	5 (26,3)	0 (0,0)
неоднородное / heterogeneous	0 (0,0)	14 (73,7)	16 (100,0)

ровный (100%) контур. Распределение РФП было на 91,9% однородным.

При визуализации очагов бактериального энцефалита гиперфиксация РФП присутствовала в 100% случаев в виде однородного накопления с четкими и неровными контурами.

Прямое сравнение возможностей ПЭТ-КТ и МРТ с контрастным усилением

В таблице 4 показано, что ПЭТ-КТ продемонстрировала чувствительность 92,3% и специфичность 73,3% при прогрессировании глиом. Сочетание МРТ с контрастным усилением и ПЭТ-КТ обеспечило 92,3% чувствительность для диагностики прогрессирования глиомы (расположение и структура поражения). Данные МРТ и ПЭТ-КТ согласуются между собой в 45 из 48 случаев (93,75%) в подтвержденной прогрессии глиомы. Следует отметить, что в 4 из 67 случаев (6,6%) аваскулярные доброкачественные астроцитомы не визуализированы. В 5 из 67 случаев (7,5%) выявлены расхождения в результатах. В 4 из 67 случаев (6,6%) требовалась дополнительная дифференциация воспалительных изменений от истинного прогрессирования опухоли.

ROC-анализ данных по индексу накопления

Критерий Мет-ИН, позволяющий отделить ПРЗГ от ПРДА, составил 2,0: при значениях Мет-

ИН в очагах $\geq 2,0$ с 95% точностью можно было предположить ПРЗГ, а при значениях $< 2,0$ – ПРДА или изменения воспалительной природы (рис. 2).

Критерий отсечки ПРДА от ПК составил 0,9 (рис. 3). Таким образом, при значениях Мет-ИН в очагах $\geq 0,9$ с точностью 95% можно было предположить ПРДА, а при значениях $< 0,9$ – ПК (табл. 5). В этих исследованиях данные об очагах воспаления не учитывались, так как РФП заведомо не позволяют разграничивать их с ПРЗГ.

Обсуждение / Discussion

Пол и возраст пациентов

Средний возраст наших пациентов составил $43,5 \pm 15,6$ года. S. Sadetzki et al. (2013 г.) [10] получили данные о том, что возраст обнаружения глиомы – в среднем $49,4 \pm 18,7$ года. В работе J. Yang et al. [11] средний возраст 69 больных с глиомами составил $48,74 \pm 14,32$ года. Таким образом, глиома может поражать пациентов любого возраста, но преобладает у взрослых старше 40 лет.

Согласно нашим результатам 51% обследованных пациентов были мужского пола, 49% – женского. Эти данные согласуются с гендерным распределением больных с глиомами, полученным Т.Ю. Скворцовой и др. (2014 г.) [12]. Согласно последним данным, 49% пациентов – мужчины, 51% – женщины. Это свидетельствует об отсутствии гендерного преобладания у больных с глиомами.

Сопоставление возможностей магнитно-резонансной томографии (МРТ) с контрастным усилением (КУ) и позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) с ^{11}C -L-метионином (^{11}C -Met) у больных с продолженным ростом глиом (n=67)

Table 4

Comparison of contrast-enhanced (CE) magnetic resonance imaging (MRI) and positron emission tomography (PET) with ^{11}C -L-methionine (^{11}C -Met) in patients with continued glial growth (n=67)

Критерий / Criterion	ПЭТ с ^{11}C -Met / ^{11}C -Met-PET	МРТ с КУ / CE-MRI	МРТ с КУ + ПЭТ с ^{11}C -Met / CE-MRI + ^{11}C -Met-PET
Истинно-положительные результаты, n (%) / True positive results, n (%)	48 (71,6)	45 (67,2)	48 (71,6)
Истинно-отрицательные результаты, n (%) / True negative results, n (%)	11 (16,4)	9 (13,4)	11 (16,4)
Ложноположительные результаты, n (%), / False positive results, n (%)	4 (6,0)	6 (13,4)	4 (6,0)
Ложноотрицательные результаты, n (%) / False negative results, n (%)	4 (6,0)	7 (9,0)	4 (6,0)
Чувствительность, % / Sensitivity, %	92,3	86,5	92,3
Специфичность, % / Specificity, %	73,3	60,0	73,3
Диагностическая точность, % / Diagnostic accuracy, %	88,1	80,5	88,1

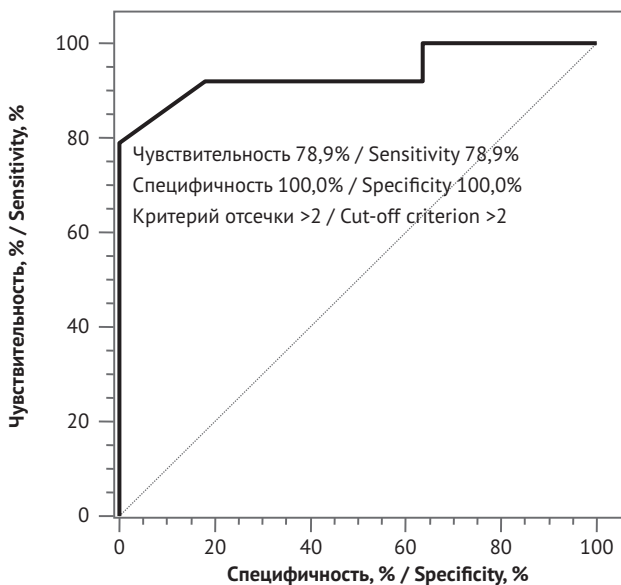


Рис. 2. Результаты ROC-анализа индексов накопления ^{11}C -L-метионина, полученных у 37 пациентов с продолженным ростом злокачественных глиом и 15 пациентов с продолженным ростом доброкачественных астроцитом

Fig. 2. Results of ROC-analysis of accumulation indices of ^{11}C -L-methionine obtained from 37 patients with continuous growth of malignant gliomas and 15 patients with continuous growth of benign astrocytomas

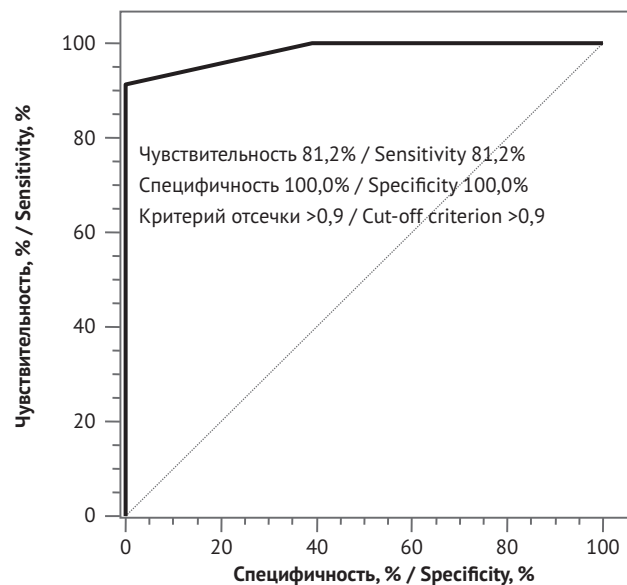


Рис. 3. Результаты ROC-анализа индексов накопления ^{11}C -L-метионина, полученных у 15 пациентов с продолженным ростом доброкачественных астроцитом и 11 пациентов с послеоперационными кистами

Fig. 3. Results of ROC-analysis of accumulation indices of ^{11}C -L-methionine obtained from 15 patients with continuous growth of benign astrocytomas and 11 patients with post-operative cysts

Степень злокачественности глиомы

Данные нашего исследования показывают, что 37 из 67 пациентов (55%) имели рецидивы злокачественной глиомы головного мозга, которые морфологически были представлены мультиформной глиобластомой и анапластической астроцитомой.

Этот результат близок к полученному в 2021 г. в США J. Yang et al. [11]: 63% изученных опухолей представляли собой глиомы злокачественного характера. Кроме того, в публикации J. Jost et al. (2023 г.) [13] у 87% пациентов были злокачественные глиомы (глиобластомы и низкокодифференци-

Значения индексов накопления ^{14}C -L-метионина (критерии отсечки) у больных с продолженным ростом доброкачественных астроцитом и злокачественных глиом (n=67)

Table 5

Values of accumulation indices of ^{14}C -L-methionine (cut-off criteria) in patients with continued growth of benign astrocytomas and malignant gliomas (n=67)

Параметр / Parameter	Значение / Value
95% случаев при продолженном росте / 95% of cases in continued growth	
доброкачественных астроцитом / of benign astrocytomas	$\geq 0,9 < 2,0$
злокачественных глиом / of malignant gliomas	$\geq 2,0$
Пороговые значения / Threshold values	$\geq 2,0$ (1,9)

рованные диффузные астроцитомы). Такое преобладание низкодифференцированных глиальных опухолей может объяснить короткую среднюю выживаемость пациентов и диффузную природу опухолевых поражений. Действительно, в нашей работе обнаружено более диффузное прогрессирование в 64,86% случаев злокачественных глиом. Диффузные глиомы очень агрессивны и быстро развиваются.

Индекс накопления метионина

В нашем исследовании получены индексы накопления $1,6 \pm 0,45$ и $2,9 \pm 0,85$ для доброкачественных и злокачественных глиом соответственно. Этот результат согласуется с данными И.Н. Пронина и др. (2020 г.) [14]: Мет-ИН составил $1,66 \pm 0,71$ для доброкачественных глиом (I и II степени) и $3,1 \pm 1,06$ для злокачественных. Таким образом, Мет-ИН остается эффективным индикатором степени злокачественности глиомы.

В своей работе мы отметили наличие прямой взаимосвязи между показателем Мет-ИН и степенью злокачественности. Это объясняется особенностями васкуляризации и метаболизма аминокислот согласно степени злокачественности. Мультифокальная глиобластома характеризуется более высокими метаболизмом и васкуляризацией, чем анапластическая астроцитомы.

В процессе исследования отмечено, что увеличение размера опухоли связано с ее гетерогенным характером. Известно, что обнаружение опухоли зависит от ее размера: чем он больше, тем выше значение измеряемой радиоактивности. По данным L. Chipiga et al. (2016 г.) [15], чем меньше размер радиоактивного объекта, тем ниже его нелинейная измеренная радиоактивность. Следует отметить, что в наше исследование не были включены пациенты с опухолями размером менее 1 см, в связи с чем невозможно сделать окончательный вывод относительно визуализации опухолей малого диаметра.

Прямые и косвенные признаки продолженного роста глиом

Гиперметаболизм наблюдался во всех случаях злокачественных глиом, в то время как 26,6% доброкачественных поражений не были гиперметаболическими. Накопление метионина в патологическом фокусе является очевидным признаком повышенного уровня метаболизма опухолей. Другие доброкачественные глиомы не визуализированы из-за их низкой васкуляризации. Наличие уровня изофиксации и гипофиксации не исключает диагностики доброкачественной опухоли в очагах поражения, идентифицированных методом МРТ.

Большинство видимых доброкачественных глиом гетерогенны, с нечеткими и неровными контурами. То же относится ко всем злокачественным глиомам, размер которых превышает 5 см. С другой стороны, в нашем исследовании все злокачественные глиомы размером менее 2 см были однородны и имели неровные контуры. Можно предполагать, что косвенные признаки неточно предсказывают природу глиомы. Преобладающий гетерогенный характер астроцитом с нерегулярными и размытыми контурами указывает на большое гистологическое разнообразие доброкачественных опухолей. Этот результат показывает, что доброкачественные астроцитомы имеют гетерогенную структуру со злокачественными признаками опухоли.

Точность диагностики, чувствительность и специфичность

В нашем исследовании чувствительность, специфичность и точность диагностики ПЭТ составили 92,3%, 73,3% и 88,1% соответственно. Это согласуется с данными, полученными в работе S. Takenaka et al. (2014 г.) [16], где точность, чувствительность и специфичность составили 92,5%, 91,2% и 87,5% соответственно. Аналогично, C. Deuschl et al. (2018 г.) [17] обнаружили, что диагностическая ПЭТ в случае рецидива глиомы имеет

точность 88%, чувствительность 96,77% и специфичность 73,68%. ^{11}C -L-метионин, по-видимому, является хорошим предсказателем прогрессии глиом и играет важную роль в послеоперационном мониторинге.

Порог прогнозирования дифференциации

С 95% точностью мы обнаружили, что прогнозируемый порог Мет-ИН при рецидиве опухоли составляет 0,9, при дифференциации доброкачественных и злокачественных глиом – 2,0. Исследование, проведенное в Китае, показало, что Мет-ИН при дифференциации глиомы и неопухолевых поражений составил 1,97 с точностью 84,4%. В то же время порог Мет-ИН при дифференциации доброкачественных глиом от злокачественных был 2,74 с точностью 87,7% [18]. Такое различие с нашими результатами объясняется тем, что мы не использовали метод определения стандартизованного показателя накопления (standardized uptake value, SUV) для расчета Мет-ИН.

Заключение / Conclusion

Проведенное нами исследование осветило диагностические трудности современных методов нейровизуализации, таких как МРТ и ПЭТ-КТ, в случае прогрессирования глиомы. Хотя ПЭТ-КТ обладает хорошей чувствительностью в дифференциации послеоперационных изменений у пациентов с глиомой, МРТ с контрастным усилением

необходимо проводить предварительно, чтобы обнаружить ROI, зону предполагаемой рецидивной опухоли или продолженного роста. Успешная интерпретация функциональной визуализации, такой как ПЭТ-КТ, требует предварительного получения структурных данных (размер, расположение, форма и контуры) послеоперационных поражений. Сочетание МРТ и ПЭТ-КТ позволяет оценить метаболизм опухоли и структурные изменения.

Наша работа демонстрирует, что есть возможность провести дифференциальную диагностику кистозных изменений и постлучевого глиоза от прогрессирования опухоли. Кроме того, ПЭТ-КТ показывает дифференциацию степени злокачественности глиомы и, наконец, дифференциацию анапластических астроцитов от глиобластом. Сочетанная диагностика позволила оценить эффективность терапевтического лечения и степень злокачественности опухолей глиального ряда. В то же время дифференциация глиомы по степени злокачественности имеет большое значение для обнаружения признаков злокачественности доброкачественных глиом. Гиперметаболизм остается прямым и значимым признаком злокачественности глиомы. Гипометаболизм в послеоперационной области эффективен в исключении продолженного роста опухоли. Выявлено, что отсутствие визуализации аваскулярных глиом является одним из недостатков ПЭТ-КТ, хотя МРТ с контрастным усилением не исключает их.

Литература / References

- Каприн А.Д., Старинский В.В., Шахзадова А.О. (ред.) Злокачественные новообразования в России в 2021 году (заболеваемость и смертность). М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России; 2022: 252 с. [Kaprin AD, Starinsky VV, Shakhzadova AO (Eds) Malignant neoplasms in Russia in 2021 (incidence and mortality). Moscow: Herzen Moscow Research Institute of Oncology – branch of National Medical Research Center of Radiology; 2022: 252 pp (in Russ).]
- Гормольсова Е.В., Чернов С.В., Дмитриев А.Б. и др. Хирургическое лечение метастазов опухолей в головной мозг. Нейрохирургия. 2014; 4: 87–91. <https://doi.org/10.17650/1683-3295-2014-0-4-87-91>. [Gormolysova EV, Chernov SV, Dmitriev AB, et al. The surgical treatment of brain metastases. Russian Journal of Neurosurgery. 2014; 4: 87–91 (in Russ). <https://doi.org/10.17650/1683-3295-2014-0-4-87-91>.]
- Pouchieu C, Lacour B, Delafosse P, et al. National estimates of cancer incidence and mortality in metropolitan France between 1990 and 2018. Vol. 1: Solid tumors / Central nervous system. 2019 (in French).
- Ишматов Р.Ф., Мидленко А.И., Рябов С.Ю. и др. Опухоли головного мозга в Ульяновской области (анализ эпидемиологических показателей и состояния нейроонкологической службы). Современные проблемы науки и образования. 2015; 1-1. [Ishmatov RF, Midlenko AI, Ryabov SYu, et al. Brain tumors in the Ulyanovsk Region (analysis of epidemiological indicators and the state of the neuro-oncology service). Contemporary Problems of Science and Education. 2015; 1-1 (in Russ).]
- Кит О.И., Игнатов С.Н., Златник Е.Ю. и др. Роль цитокинов в формировании иммунологического микроокружения при низкодифференцированных глиомах головного мозга, их значимость для диагностики и иммунотерапии. Медицинский вестник Северного Кавказа. 2021; 16(4): 433–8. <https://doi.org/10.14300/mnnc.2021.16106>. [Kit OI, Ignatov SN, Zlatnik EYu, et al. Role of cytokines in the formation of immunological microenvironment in low-grade brain gliomas, their significance for diagnosis and immunotherapy. Medical News of North Caucasus. 2021; 16(4): 433–8 (in Russ). <https://doi.org/10.14300/mnnc.2021.16106>.]
- Данилов Г.В., Калаева Д.Б., Вихрова Н.Б. и др. Технологии радиомики в определении индекса накопления радиофармпрепарата в глиобластоме по данным ПЭТ/КТ с ^{11}C -метионином. Современные технологии в медицине. 2023; 15(1): 5. <https://doi.org/10.17691/stm2023.15.1.01>. [Danilov GV, Kalayeva DB, Vikhrova NB, et al. Radiomics in determining tumor-to-normal brain SUV ratio based on ^{11}C -methionine PET/CT in glioblastoma. Sovremennye tehnologii v medicine / Modern Technologies in Medicine. 2023; 15(1): 5 (in Russ). <https://doi.org/10.17691/stm2023.15.1.01>.]

7. Пронин И.Н., Хохлова Е.В., Конакова Т.А. и др. Применение ПЭТ-КТ с ^{11}C -метионином в первичной диагностике глиом. Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2020; 120(8): 51–6. <https://doi.org/10.17116/jnevro202012008151>. [Pronin IN, Khokhlova EV, Konakova TA, et al. Positron emission tomography with ^{11}C -methionine in primary brain tumor diagnosis. S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry. 2020; 120(8): 51–6 (in Russ). <https://doi.org/10.17116/jnevro202012008151>.]
8. Вихрова Н.Б., Постнов А.А., Калаева Д.Б. и др. Позитронно-эмиссионная томография с ^{11}C -метионином и ^{18}F -фтордезоксиглюкозой в неинвазивной дифференциальной диагностике анапластических астроцитом и глиобластом. Радиология – практика. 2020; 2: 8–19. [Vikhrova NB, Postnov AA, Kalaeva DB, et al. ^{11}C -methionine and ^{18}F -fluorodeoxyglucose positron emission tomography in noninvasive differential diagnosis of anaplastic astrocytoma and glioblastoma. Radiology and Practice. 2020; 2: 8–19 (in Russ).]
9. Comar D, Cartron J, Maziere M, Marazano C. Labelling and metabolism of methionine-methyl- ^{11}C . Eur J Nucl Med. 1976; 1(1): 11–4. <https://doi.org/10.1007/BF00253260>.
10. Sadetzki S, Bruchim R, Oberman B, et al. Description of selected characteristics of familial glioma patients – results from the Gliogene Consortium. Eur J Cancer. 2013; 49(6): 1335–45. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2012.11.009>.
11. Yang J, Gohel S, Zhang Z, et al. Glioma-induced disruption of resting-state functional connectivity and amplitude of low-frequency fluctuations in the Salience Network. AJNR Am J Neuroradiol. 2021; 42(3): 551–8. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A6929>.
12. Скворцова Т.Ю., Гурчин А.Ф., Савинцева Ж.И. Возможности позитронно-эмиссионной томографии с ^{11}C -метионином в распознавании псевдопрогрессии церебральных глиом после комбинированного лечения. Журнал «Вопросы нейрохирургии» имени Н.Н. Бурденко. 2014; 78(4): 50–8. [Skvortsova Tlu, Brodskaja ZL, Gurchin AF. PET using ^{11}C -methionine in recognition of pseudoprogression in cerebral glioma after combined treatment. Burdenko's Journal of Neurosurgery. 2014; 78(4): 50–8.]
13. Jost J, Mütter M, Brandt R, et al. Conceptual development of an intensive exercise program for glioma patients (ActiNO): summary of clinical experience. J Neurooncol. 2023; 163(2): 367–76. <https://doi.org/10.1007/s11060-023-04354-y>.
14. Пронин И.Н., Хохлова Е.В., Конакова Т.А. и др. Применение ПЭТ-КТ с ^{11}C -метионином в первичной диагностике глиом. Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2020; 120(8): 51–6. <https://doi.org/10.17116/jnevro202012008151>. [Pronin IN, Khokhlova EV, Konakova TA, et al. Positron emission tomography with ^{11}C -methionine in primary brain tumor diagnosis. S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry. 2020; 120(8): 51–6 (in Russ). <https://doi.org/10.17116/jnevro202012008151>.]
15. Chipiga L, Sydoff M, Zvonova I, Bernhardsson C. Investigation of partial volume effect in different PET/CT systems: a comparison of results using the MADEIRA phantom and the NEMA NU-2 2001 phantom. Radiat Prot Dosimetry. 2016; 169(1-4): 365–70. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw027>.
16. Takenaka S, Asano Y, Shinoda J, et al. Comparison of ^{11}C -methionine, ^{11}C -choline, and ^{18}F -fluorodeoxyglucose-positron emission tomography for distinguishing glioma recurrence from radiation necrosis. Neurol Med Chir. 2013; 54(4): 280–9. <https://doi.org/10.2176/nmc.0a2013-0117>.
17. Deuschl C, Kirchner J, Poeppel TD, et al. ^{11}C -MET PET/MRI for detection of recurrent glioma. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2018; 45(4): 593–601. <https://doi.org/10.1007/s00259-017-3916-9>.
18. He Q, Zhang L, Zhang B, et al. Diagnostic accuracy of ^{13}N -ammonia PET, ^{11}C -methionine PET and ^{18}F -fluorodeoxyglucose PET: a comparative study in patients with suspected cerebral glioma. BMC Cancer. 2019; 19(1): 332. <https://doi.org/10.1186/s12885-019-5560-1>.