

## СОВМЕЩЕННАЯ ПОЗИТРОННО-ЭМИССИОННАЯ ТОМОГРАФИЯ/МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ТОМОГРАФИЯ В ПОДГОТОВКЕ И ПРОВЕДЕНИИ СТЕРЕОТАКСИЧЕСКИХ ВМЕШАТЕЛЬСТВ ПРИ ОПУХОЛЯХ ГОЛОВНОГО МОЗГА

**А.И. Холявин**, д. м. н., заведующий лабораторией стереотаксических методов;

**В.Б. Низковолос**, д. т. н., вед. науч. сотр.;

**А.Ф. Гурчин**, к. м. н., врач-нейрохирург;

**Т.Ю. Скворцова**, к. м. н., вед. науч. сотр.

ФГБУН «Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой» Российской академии наук,  
ул. Академика Павлова, 9, Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация

### A FUSED PET/MRI IN A PLANNING AND PERFORMING STEREOTACTIC OPERATIONS IN BRAIN TUMORS

**A.I. Kholyavin**, MD, PhD, DSc, Head of Stereotactic Department;

**V.B. Nizkovolos**, Dr. Tech. Sc., Leading Researcher;

**A.F. Gurchin**, MD, PhD, Neurosurgeon;

**T.Yu. Skvortsova**, MD, PhD, Leading Researcher

N.P. Bekhtereva Institute of Human Brain,  
ul. Akademika Pavlova, 9, St.-Petersburg, 197376, Russian Federation

*Цель исследования* – изучение диагностических возможностей МРТ и ПЭТ/КТ, а также доступных пользовательских программ для обработки DICOM-изображений при осуществлении предоперационного планирования стереотаксических вмешательств у пациентов с глубинными церебральными глиомами в условиях совмещения изображений головного мозга.

*Материал и методы.* Подготовлено и проведено 35 стереотаксических операций (биопсий и лечебных криодеструкций) у пациентов с опухолями головного мозга глубокой локализации. Для нацеливания на внутриопухолевые мишени в предоперационном периоде пациентам выполняли МРТ-сканирование в стереотаксических условиях и ПЭТ/КТ-сканирование с туморотропным радиофармпрепаратом  $^{11}\text{C}$ -метионином. Планирование операций проводилось на совмещенных МРТ/ПЭТ-изображениях. Совмещение осуществляли при помощи диагностической рабочей станции Philips и навигационной станции Medtronic StealthStation S7.

*Результаты.* Совмещение МРТ- и ПЭТ-изображений при помощи прикладных программных пакетов является удобным инструментом для прецизионного планирования целевых точек, доступов и траекторий введения стереотаксической канюли в мозг. На совмещенном изображении ПЭТ-компонент позволяет осуществлять планирование целевых зон для биопсии и избирательной деструкции опухоли благодаря способности радиофармпрепарата избирательно накапливаться в наиболее злокачественных участках опухоли. При этом МРТ-компонент, обеспечивая четкую анатомическую визуализацию, дает возможность проводить планирование безопасных траекторий стереотаксического доступа вне проекций функционально значимых зон, проводящих путей и внутри-мозговых сосудов, что снижает риск интраоперационных осложнений. Кроме того, МРТ обеспечивает визуализацию реперных элементов для стереотаксических расчетов.

*Заключение.* Продемонстрирована высокая эффективность предоперационного планирования на совмещенных магнитно-резонансных/позитронно-эмиссионных томограммах. Предложенный метод планирования операций позволяет по-

*Objective* – study of the diagnostic capabilities of MRI and PET/CT scanners and the available user programs for processing DICOM-images in the implementation of the preoperative planning of stereotactic interventions in patients with deep cerebral gliomas in terms of fusion the scans of a brain.

*Material and methods.* 35 stereotactic surgeries (biopsies and treatment cryoablations) were preplanned and then conducted in patients with brain deep-seated tumors. Patients underwent MRI-scanning in stereotactic conditions and PET/CT scanning with the tumor-specific radiotracer  $^{11}\text{C}$ -methionine for stereotactic targeting in preoperative period. Stereotactic planning was conducted on fused MRI/PET images. A co-registration was carried out using a diagnostic workstation Philips and neuronavigation station Medtronic StealthStation S7.

*Results.* A fusion of MRI and PET images using application software is a convenient tool for precise planning of target points and trajectories for insertion stereotactic cannula into a brain. On a fused image the PET-component enables to plan target areas for biopsy and selective ablation of the tumor, due to the ability of a radiotracer to accumulate selectively in the most malignant sites of a tumor. While MRI component, providing a clear anatomical visualization, allows the planning safe trajectories of stereotactic access out of eloquent areas, pathways of brain and intracerebral vessels, which reduces the risk of intraoperative complications. In addition, MRI provides imaging of fiducial markers for stereotactic calculations.

*Conclusion.* High efficiency of preoperative planning on fused MRI/PET scans was demonstrated. The proposed planning method allows to increase the effectiveness of biopsies and to prevent the prolonged growth of brain glial tumors, even when their selective stereotactic ablation, as well as to ensure a low level of postoperative complications.

*Index terms:* magnetic resonance imaging; positron emission tomography;  $^{11}\text{C}$ -methionine; glioma; stereotaxic techniques; neuronavigation.

For citation: Kholyavin A.I., Nizkovolos V.B., Gurchin A.F., Skvortsova T.Yu. A fused PET/MRI in a planning and performing

высить информативность биопсий и предотвратить продолженный рост глиальных опухолей мозга даже при их частичной стереотаксической деструкции, а также обеспечить низкий уровень послеоперационных осложнений.

**Ключевые слова:** магнитно-резонансная томография; позитронно-эмиссионная томография;  $^{11}\text{C}$ -метионин; глиома; стереотаксис; нейронавигация.

**Для цитирования:** Холявин А.И., Низковолос В.Б., Гурчин А.Ф., Скворцова Т.Ю. Совмещенная позитронно-эмиссионная томография/магнитно-резонансная томография в подготовке и проведении стереотаксических вмешательств при опухолях головного мозга. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2017; 98 (5): 238–45. DOI: 10.20862/0042-4676-2017-98-5-238-245

**Для корреспонденции:** Холявин Андрей Иванович; E-mail: Kholiyavin@ihb.spb.ru

## Введение

Стереотаксические операции являются методом выбора при ведении пациентов с опухолями головного мозга, расположенными в глубинных и функционально значимых отделах, когда удаление образования традиционным (открытым) способом противопоказано [1, 2]. Во время таких операций в глубинные отделы мозга через фрезевое отверстие при помощи манипулятора прицельно вводится канюля для выполнения диагностического (биопсия) или лечебного (деструкция новообразования) воздействия. Существенное значение для результативности вмешательства и минимизации осложнений имеет процедура предоперационной подготовки пациента на томографе.

Основными задачами предоперационной подготовки являются определение участков новообразований, наиболее информативных для взятия биопсийного материала, патологических зон, подлежащих стереотаксической деструкции, а также планирование очагов разрушения, максимально охватывающих новообразование и не затрагивающих функционально значимых зон и проводящих путей мозга. Кроме того, необходимо осуществить планирование наиболее безопасных траекторий введения стереотаксического инструмента, не повреждающих паренхиматозные сосуды. Наконец, при подготовке операций требуется получение пространственной информации, нужной для математических рас-

четов интраоперационного нацеливания стереотаксического манипулятора на выбранные целевые точки мозга [3].

Возможность осуществления полноценного планирования стереотаксических вмешательств возрастает при постпроцессинговой обработке томографических изображений головного мозга пациента. В частности, речь идет о совмещении («fusion») нескольких изображений мозга, полученных при различных вариантах томографии.

Целью настоящего исследования является изучение возможностей диагностических магнитно-резонансной томографии (МРТ), совмещенной позитронно-эмиссионной и компьютерной томографии (ПЭТ/КТ) и доступных пользовательских программ для обработки DICOM-изображений при осуществлении предоперационного планирования стереотаксических вмешательств у пациентов с глубинными глиомами в условиях совмещения изображений головного мозга.

## Материал и методы

Предоперационное планирование с использованием совмещения предоперационных МРТ- и ПЭТ-изображений осуществлено нами при подготовке 35 стереотаксических операций биопсии и криодеструкции, выполненных в нейрохирургическом отделении ИМЧ РАН у пациентов с внутримозговыми опухолями (см. таблицу). Новообразования локализовались в области центральных извилин, базальных ганглиев, варолиевого моста с распро-

странением на мозжечок, а также глубинных отделов височной, лобной и теменной долей.

Учитывая локализацию образований, хирургическое лечение осуществляли стереотаксическим способом. Выполняли биопсию, тотальную или локальную селективную многопозиционную криодеструкцию при помощи криохирургического аппарата конструкции ИМЧ РАН [4].

Наведение криохирургической канюли на целевые точки опухоли осуществляли с использованием стереотаксической системы ПОАНИК (ГНЦ ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург) [5] и системы безрамной нейронавигации Medtronic StealthStation S7 [6].

МРТ-исследования выполнены на магнитно-резонансном томографе Philips Achieva с напряженностью магнитного поля 3 Тл с использованием катушки 8-Head. После введения контрастного вещества магневист в количестве 20 мл алгоритм сканирования включал постконтрастное исследование в режиме T1-ВИ с изотропным вокселем, с толщиной среза, равной 1 мм без межсрезового интервала, с захватом всей головы пациента. Сканирование проводилось в режиме стереотаксической МРТ, то есть со стереотаксическим локализатором, фиксированным к голове.

ПЭТ-исследования проводились на одном из двух позитронно-эмиссионных томографов, каждый из которых совмещен с 16-спиральным рентгеновским компьютерным томографом: ПЭТ/КТ Gemini TF Base производства

**For correspondence:** Andrey I. Kholiyavin; E-mail: Kholiyavin@ihb.spb.ru

**Information about authors:**  
Kholiyavin A.I., orcid.org/0000-0003-1934-5458  
Nizkovolos V.B., orcid.org/0000-0001-9797-7819  
Gurchin A.F., orcid.org/0000-0002-3843-7967  
Skvortsova T.Yu., orcid.org/0000-0003-0392-7576

**Acknowledgements.** The study had no sponsorship.

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

Received June 30, 2017

Accepted July 14, 2017

фирмы Philips или ПЭТ/КТ GE Healthcare Discovery™ 710. Выбор конкретного томографа носил случайный характер. Оба совмещенных позитронно-эмиссионных/компьютерных томографа имеют сходное пространственное разрешение ПЭТ-сканера, равное 5 мм. Дополнительно КТ использовалась для коррекции гамма-квантов на аттенуацию.

У всех больных ПЭТ/КТ-исследования выполнены с неспецифическим туморотропным радиофармпрепаратом (РФП) L-[метил-<sup>11</sup>C]-метионин ([<sup>11</sup>C]метионин). В ИМЧ РАН препарат получают on-line <sup>11</sup>C-метилением L-гомоцистеинтиолактона гидрохлорида (лактона) на картридже с сорбентом для твердофазной экстракции по ранее описанной методике [7]. Продукт получают с достаточно высоким радиохимическим выходом ( $75 \pm 3\%$  от активности метилирующего агента, [<sup>11</sup>C]CH<sub>3</sub>I) и стабильно высоким содержанием L-изомера ( $93,7 \pm 0,5\%$ ), удовлетворяющим требованиям клинического применения препарата. Синтез <sup>11</sup>C-метионина осуществляют на полностью автоматизированном модуле, сконструированном в ИМЧ РАН.

ПЭТ/КТ-исследование начинали через 10 мин после внутривенного введения <sup>11</sup>C-метионина в дозе 6–10 мКи. Вначале выполнялась низкодозовая КТ, вслед за которой немедленно начиналось ПЭТ-сканирование продолжительностью 10 мин.

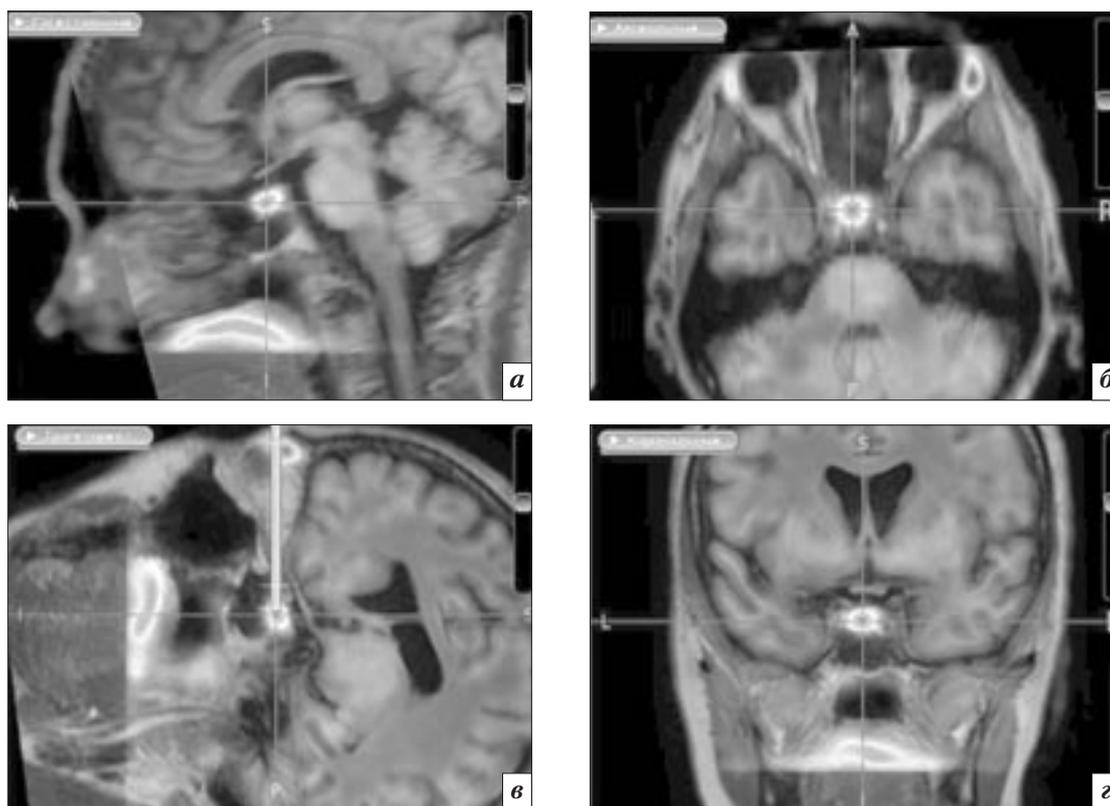
Анализ ПЭТ-результатов проводился на рабочей станции, с возможностью совмещения КТ- и ПЭТ-изображений. Визуальный анализ ПЭТ-изображений позволял выявить области повышенного захвата <sup>11</sup>C-метионина, определить их локализацию, границы и величину. Оценка интенсивности захвата <sup>11</sup>C-метионина базировалась на вычислении индекса накопления (ИН), который рассчитывали путем деления накопленной активности РФП в опухоли на величину ак-

### Общая характеристика больных

Показатель	Значение	
	абс.	%
Пол: мужской/женский	10/25	29/71
Возраст (среднее и стандартное отклонение), лет	43±13	23–76
Локализация поражения		
ствол мозга и мозжечок	1	3
мозолистое тело	1	3
подкорковые ядра и таламус	4	12
центральные извилины	7	20
глубинные отделы лобной доли	11	32
глубинные отделы теменной доли	4	12
глубинные отделы височной доли	5	14
глубинные отделы затылочной доли	2	5
Гистоструктура опухоли		
пилоцитарная астроцитома	1	3
диффузная астроцитома	16	45
олигоастроцитома	1	3
анапластическая астроцитома	9	26
анапластическая олигоастроцитома	1	3
глиобластома	2	5
лимфома	1	3
лучевой некроз	2	6
воспалительное поражение	2	6
Индекс накопления метионина		
1,0 и менее	5	14
1,1–2,0	19	54
2,1–3,0	9	26
3,1 и более	2	6
Степень злокачественности глиом		
I–II	18	60
III	10	34
IV	2	6
Вид вмешательства		
стереотаксическая биопсия	24	69
стереотаксическая криодеструкция	11	31

тивности в референтном участке, который располагали в контралатеральной коре головного мозга. Совмещение МРТ- и ПЭТ-изображений, а также получение стереотаксических координат осуществляли на диагностической рабочей станции Philips с использованием программного пакета Philips IntelliSpace Portal (опции Multimodality Viewer и Automatic Registration, с алгоритмами местной корреляции, кросс-корреляции, нормализованной взаимной информации), а также на навигационной станции Medtronic StealthStation S7 (программа StealthMerge). Программы выполняют автоматическую корегистрацию МРТ- и ПЭТ-

изображений мозга с возможностью последующей ручной коррекции на совмещенных срезах в аксиальной, сагиттальной и фронтальной плоскостях. При построении совмещенной картинки в качестве базового изображения использовали МРТ в серых тонах, на которое «накладывалось» в виде оверлея полупрозрачное цветное ПЭТ-изображение. Для «раскраски» ПЭТ-изображения применяли цветовую шкалу «Rainbow». Для оценки точности автоматического совмещения двух изображений мозга пациента использовали анатомические маркеры. В качестве контрольных анатомических маркеров для совмещения МРТ-



**Рис. 1.** Контроль точности совмещения МРТ- и ПЭТ-изображений по анатомическим маркерам. Базовое изображение: МРТ в режиме T1-ВИ, оверлей: ПЭТ с  $^{11}\text{C}$ -метионином в тональности «rainbow»: *a* – сагиттальная плоскость; *б* – аксиальная плоскость; *в* – косая плоскость сечения мозга; *г* – корональная плоскость. На срезах и реконструкциях в трех плоскостях сечения (*a*, *б* и *г*) отмечено совпадение изображений гипофиза, блуменбахова ската, вершины IV желудочка. Белая линия в косой плоскости (*в*) указывает на зону накопления радиофармпрепарата в области гипофиза, совпадающую с положением турецкого седла

и ПЭТ-изображений наряду с контурами головы и мозга пациента использовали гипофиз, блуменбахов скат и вершину IV желудочка (рис. 1).

### Результаты

При использовании станции Philips автоматическое совмещение объемных реконструкций МРТ- и ПЭТ-изображений достигалось в течение нескольких секунд. При этом практически во всех случаях отмечалась необходимость ручной коррекции во всех трех плоскостях сечения мозга до совпадения изображений анатомических маркеров в пределах 3–5 мм. При работе с навигационной станцией Medtronic после загрузки программой МРТ- и ПЭТ-изображений пациента автоматическое совмещение изображений также достигалось в течение 4–6 с,

при этом необходимость в ручной коррекции отсутствовала.

При планировании целевых точек для стереотаксической биопсии и криодеструкции учитывали неоднородность распределения уровней накопления  $^{11}\text{C}$ -метионина в объеме опухоли, отображаемую ПЭТ-компонентом совмещенного изображения. Установлено, что, как правило, в объеме опухоли существуют зоны с различным уровнем накопления радиофармпрепарата [8]. Степень накопления аминокислоты  $^{11}\text{C}$ -метионина в опухолевой ткани в те сроки, в которые проводится исследование, отражает главным образом скорость транспорта аминокислот в клетку, который, в свою очередь, тесно сопряжен с повышенным метаболическим запросом опухолевой ткани и процессами ангиогенеза. ПЭТ-изображение

можно расценить как цветовую карту зон внутримозговой опухоли с различной степенью метаболической активности и клеточной плотности и, соответственно, с различной степенью злокачественности. Кроме цветового картирования использованные программы позволяют определять количественно уровень накопления метионина в различных зонах опухоли при наведении экранного курсора на интересующие участки новообразования. При биопсии и локальной многопозиционной стереотаксической деструкции целевые точки планировали в зонах максимального накопления РФП, что более точно по сравнению с постконтрастной МРТ указывало на метаболически активные участки опухоли.

Таким образом, на совмещенном изображении ПЭТ-компонент служил основой для плани-

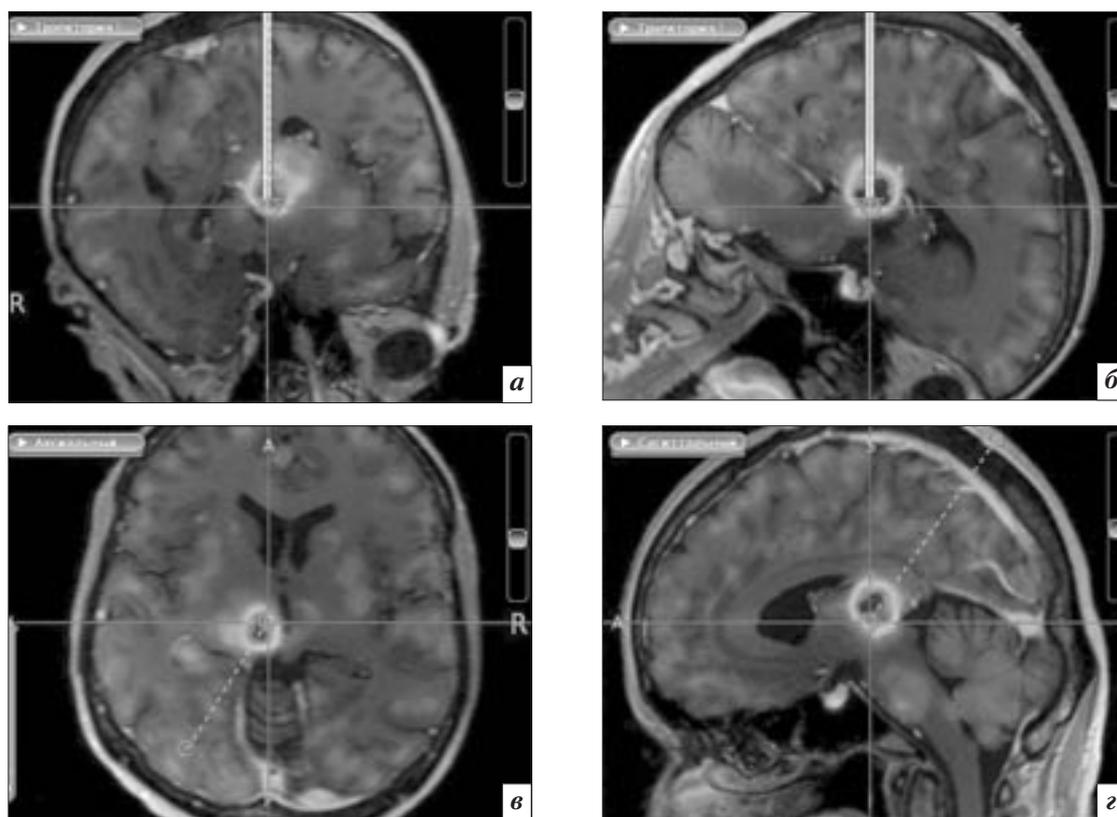
рования целевых точек стереотаксического вмешательства. При этом МРТ-компонент совмещенного изображения обеспечивал четкую анатомическую визуализацию структур и сосудов головного мозга. Это позволяло осуществлять планирование безопасных траекторий стереотаксического доступа вне проекций функционально значимых зон. При планировании убеждались в том, что линия, отображающая прохождение стереотаксического инструмента, не пересекала складки мягкой мозговой оболочки, изображения паренхиматозных сосудов и проводящие пути мозга (например, пирамидный и зрительный тракты). При локализации новообразований мозга в области лобной доли, базальных ганглиев, передних отделов таламуса и прецентральной извилины стереотаксические доступы осуще-

ствлялись через среднюю лобную извилину. При опухолях задних отделов таламуса и постцентральной извилины зоной погружения инструмента являлась верхняя теменная доля. При новообразованиях островка инструмент вводили в мозг через верхнюю лобную извилину. При опухолях глубоких отделов височной доли фрезевое отверстие для погружения инструмента накладывали в области нижней или средней височной извилины. При новообразованиях задней черепной ямки вход стереотаксической канюли в мозг осуществляли через полушарие мозжечка. Такой выбор стереотаксических доступов на предоперационных томограммах у всех пациентов позволял избежать прохождения инструмента через функционально значимые и богато васкуляризованные зоны мозга (рис. 2). Это дополни-

тельно снижало травматичность операции и таким образом предотвращало развитие интраоперационных осложнений. Ни у одного из прооперированных пациентов на послеоперационных томограммах не отмечено формирования паренхиматозных кровоизлияний, связанных с прохождением стереотаксической канюли через мозг.

Кроме планирования стереотаксических траекторий МРТ-компонент совмещенного изображения позволял осуществлять регистрацию пространственных координат реперных элементов стереотаксической системы для стереотаксических расчетов. При этом совмещение МРТ и ПЭТ для стереотаксического наведения исключало необходимость радиоактивного контрастирования реперных элементов.

При использовании рабочей станции Philips на томограммах



**Рис. 2.** ПЭТ/МРТ-планирование стереотаксического доступа для биопсии и криодеструкции опухоли левого таламуса. Базовое изображение: МРТ в режиме T1-ВИ, оверлей: ПЭТ с  $^{11}\text{C}$ -метионином в тональности «rainbow»: *a, б* – две взаимно перпендикулярные плоскости, проходящие через траекторию введения стереотаксической канюли; *в* – аксиальная плоскость, проходящая через целевую точку; *г* – сагиттальная плоскость, проходящая через целевую точку. Белая линия на рисунках *a* и *б* обозначает траекторию введения стереотаксической канюли, белый пунктир на рисунках *в* и *г* – проекцию траектории на аксиальный (*в*) и сагиттальный (*г*) срезы мозга пациента. Точка входа траектории – в левой затылочной области, траектория не пересекает паренхиматозные сосуды, пиальные складки и желудочки мозга

определяли координаты целевых точек и реперных меток, после чего вводили их в программу стереотаксических расчетов для настройки стереотаксической системы. При работе с навигационной системой план операции, намеченный в программе StealthMerge, воспроизводили в операционной после регистрации меток навигационной системой. Во всех случаях многопозиционное наведение стереотаксической криоканюли в целевые точки внутримозговой опухоли во время операции осуществляли через фрезевое отверстие. Наглядно точность операции позволяло подтвердить совмещение (корегистрация) послеоперационной компьютерной и дооперационных магнитно-резонансной и позитронно-эмиссионной томограмм (рис. 3).

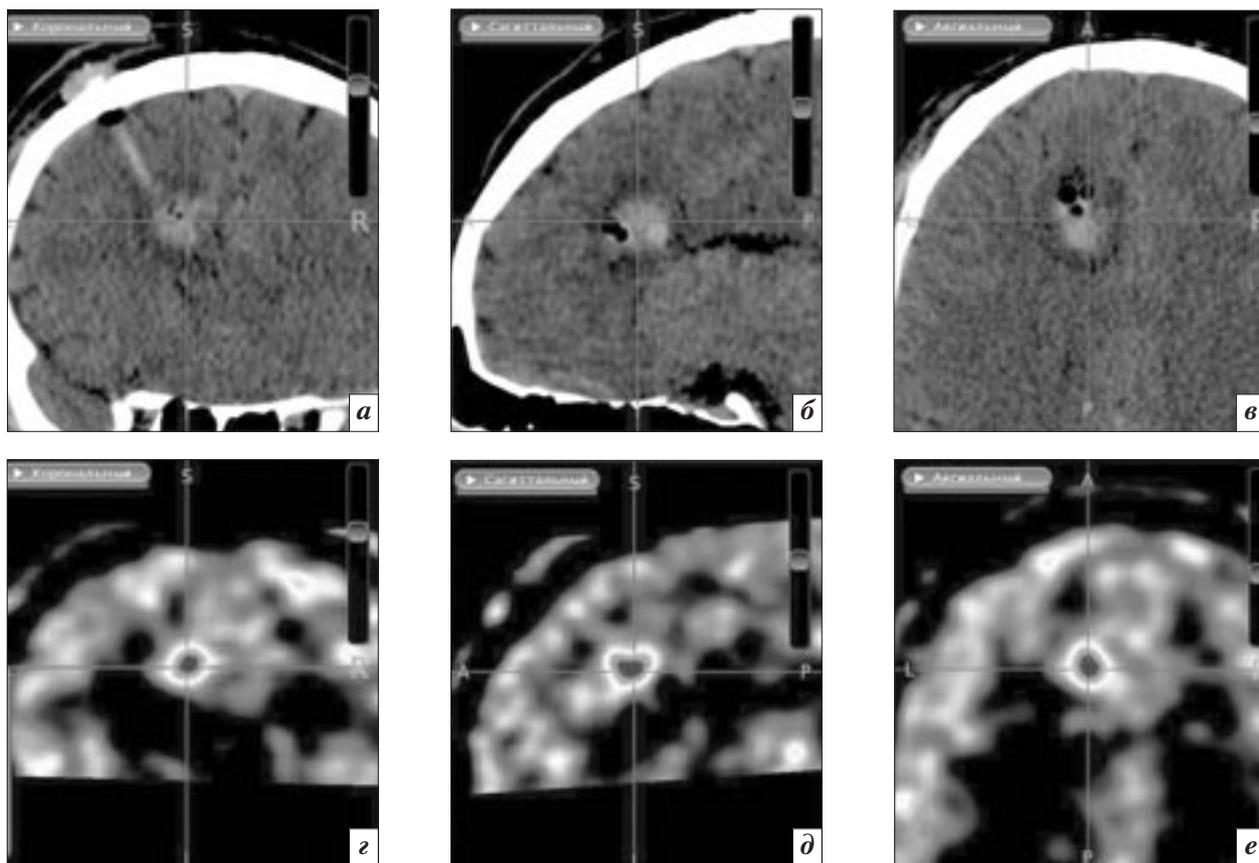
Результаты гистологического исследования подтвердили эф-

фективность использованного способа выбора целевых точек в массе опухоли. У всех пациентов биопсийный материал был информативным и позволил установить достоверный гистологический диагноз. Это в том числе определяется благодаря использованию для проведения ПЭТ такого РФП, как  $^{11}\text{C}$ -метионин, который, по мнению многих авторов [9–11], является гораздо более подходящим радиотрейсером для поиска целевых точек при биопсии глиальных новообразований, чем  $^{18}\text{F}$ -фтордезоксиглюкоза.

На томограммах головного мозга, выполненных в раннем послеоперационном периоде криодеструкции, размеры и положение очагов крионекроза опухоли соответствовали запланированным. По данным ПЭТ, в зонах деструкции отмечено отсутствие накопления радиофармпрепара-

та. Стойкое нарастание послеоперационного неврологического дефицита отмечено лишь у 2 (5,7%) пациентов, несмотря на расположение новообразований в глубинных и функционально значимых зонах мозга, что свидетельствует о существенной роли предоперационного планирования на совмещенных томограммах при обеспечении безопасности стереотаксических вмешательств.

При этом на послеоперационных МРТ и ПЭТ, выполненных в различные сроки динамического наблюдения за пациентами после стереотаксической криодеструкции пролиферативно активных зон, отмечено формирование ликворных кист в зонах деструкций. Кроме того, выявлено уменьшение размеров оставшихся неразрушенными участков опухоли, что связано с криохирургической активацией клеточного иммунного ответа.



**Рис. 3.** Контроль результата стереотаксической криодеструкции опухоли парасагитальных отделов левой лобной доли. Корегистрированные изображения: сверху – послеоперационная КТ (*а* – корональная плоскость; *б* – сагиттальная плоскость; *в* – аксиальная плоскость), внизу – дооперационная ПЭТ с  $^{11}\text{C}$ -метионином в тональности «rainbow» (*г* – корональная плоскость; *д* – сагиттальная плоскость; *е* – аксиальная плоскость). Отмечено полное перекрытие очага накопления радиофармпрепарата зоной послеоперационного крионекроза

## Обсуждение

По мнению большинства специалистов [12–13], наиболее информативным методом предоперационной подготовки пациентов к стереотаксическим операциям в настоящее время является МРТ. По сравнению с КТ она дает более четкую картину внутричерепного распространения опухолей головного мозга, анатомии внутримозговых структур, а также паренхиматозных и оболочечных сосудов. Полезными для стереотаксического планирования программами являются МРТ-трактография, функциональная МРТ, позволяющие выявить участки мозга, интраоперационного повреждения которых необходимо избегать. Достаточно точно могут быть визуализированы и зарегистрированы стереотаксические реперы [14].

Однако в ряде случаев необходимо также использовать данные ПЭТ, которая дает возможность визуализировать наиболее злокачественные участки опухолей головного мозга, подлежащие биопсии и селективной деструкции. Доказано, что применение ПЭТ во время предоперационной подготовки повышает достоверность гистологического диагноза для стереотаксических биопсий [9, 10] и увеличивает показатели выживаемости при избирательной многопозиционной стереотаксической деструкции опухолей [1]. В то же время ПЭТ затруднительно использовать для стереотаксических расчетов, поскольку она имеет низкую разрешающую способность, не позволяет распознать на томограммах многие структуры мозга, сосуды и реперные элементы рамы стереотаксического манипулятора [15].

В ряде нейрохирургических клиник изображения головного мозга, получаемые при помощи совмещенных ПЭТ/КТ-сканеров, применяются для стереотаксического наведения при внутримозговых новообразованиях [16, 17]. На совмещенном ПЭТ/КТ-изображении мозга ПЭТ-компонент

позволяет осуществлять предоперационное планирование целевых зон для биопсии и деструкции опухоли благодаря способности радиофармпрепарата  $^{11}\text{C}$ -метионина избирательно накапливаться в участках глиальной опухоли, характеризующихся максимальным уровнем метаболической активности и обеспечивающих свойства злокачественности новообразования. КТ-компонент совмещенного изображения используется для регистрации стереотаксических реперов и планирования доступов к новообразованию. Однако недостаточная четкость границ опухоли и низкая контрастность изображения тканей мозга на компьютерных томограммах не дают оснований считать эту методику оптимальной при подготовке стереотаксических вмешательств при опухолях, располагающихся вблизи функционально значимых структур мозга.

Следовательно, при глубокой локализации новообразований для предоперационного стереотаксического планирования на совмещенных с ПЭТ изображениях мозга наиболее целесообразно использовать данные не КТ, а МРТ. При этом на данный момент в России отсутствует возможность использовать томографы для ПЭТ/МРТ с целью планирования стереотаксических вмешательств при церебральных глиомах. Да и за рубежом такие аппараты в настоящее время представляют собой большую редкость и отличаются крайне высокой ценой.

Решением данной проблемы может являться «программное» совмещение МРТ- и ПЭТ-изображений мозга пациента, выполненных во время различных исследований. На сегодняшний день существуют доступные прикладные программные пакеты для постпроцессинговой обработки диагностических изображений. При этом разработаны несколько альтернативных математических алгоритмов совмещения изображений [18, 19], в некоторых программах могут использоваться

сразу несколько алгоритмов. Из виртуально совмещенных объемных МРТ- и ПЭТ-изображений мозга при дальнейшей работе программы возможно получение изображений плоских совмещенных ПЭТ/МРТ-срезов мозга, в любом направлении сечения. Такие реконструированные плоские ПЭТ/МРТ-срезы могут быть использованы для анализа и предоперационного планирования стереотаксических вмешательств.

Для совмещения результатов МРТ- и ПЭТ-исследований пациентов можно использовать компоненты программного обеспечения рабочих станций, которыми комплектуются современные отделения лучевой диагностики; специализированное программное обеспечение компьютеров, входящих в комплектацию стереотаксических манипуляторов и систем безрамной нейронавигации; бесплатные и коммерческие программы обработки диагностических изображений, которые могут быть установлены на персональные компьютеры.

В нашем исследовании у большинства прооперированных пациентов отмечено эффективное торможение или прекращение роста новообразования. Такая тактика избирательного разрушения пролиферативно-активных зон при распространенных глубинных глиомах, ставшая возможной при осуществлении ПЭТ/МРТ-планирования, позволила отказаться от тотального разрушения опухоли и ограничиться ее частичной деструкцией, снизив риск осложнений [1, 17].

## Заключение

Как показал наш опыт, точность достигаемого совмещения позитронно-эмиссионных и магнитно-резонансных томограмм с использованием имеющихся специальных программ является приемлемой для планирования и оценки результатов малоинвазивных нефункциональных стереотаксических вмешательств. Результаты операций продемонстрировали высокую эффективность

предоперационного планирования на совмещенных томограммах, информативность биопсий и предотвращение продолженного роста глиальных опухолей даже при их частичной стереотаксической деструкции, а также низкий уровень послеоперационных осложнений. Наведение на мишени при помощи ПЭТ/МРТ с туморотропным радиофармпрепаратом целесообразно применять при планировании биопсий и лечебных стереотаксических деструкций у больных с глубинным распространением внутримозговых опухолей.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

### Литература [References]

1. Мартынов Б.В., Холявин А.И., Парфенов В.Е., Низковолос В.Б., Труфанов В.Е., Фокин В.А. и др. Метод стереотаксической криодеструкции в лечении больных с глиомами головного мозга. *Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко*. 2011; 75 (4): 17–24. [Martynov B.V., Kholyavin A.I., Parfenov V.E., Nizkovolos V.B., Trufanov V.E., Fokin V.A. et al. The method of a stereotactic cryodestruction in a treatment of patients with cerebral gliomas. *Voprosy Neyrokhirurgii imeni N.N. Burdenko (Problems of Neurosurgery Named after N.N. Burdenko, Russian journal)*. 2011; 75 (4): 17–24 (in Russ.).]
2. Lunsford L.D., Somaza S., Kondziolka D., Flickinger J.C. Brain astrocytomas: biopsy, then irradiation. *Clin. Neurosurg.* 1995; 42: 464–79.
3. Kholyavin A.I., Nizkovolos V.B., Anichkov A.D. Tomography of brain and stereotactic guidance. *Biomed. Engineer.* 2014; 48 (1): 24–6.
4. Низковолос В.Б., Аничков А.Д. Устройство для криохирургического воздействия. Патент № 2115377 Российской Федерации. МПК7 А61В 17/36. *Изобретения. Полезные модели*. 1998; 20: 3 опублик. 20.07.98. [Nizkovolos V.B., Anichkov A.D. A device for a cryosurgery action. Patent № 2115377 Russian Federation, МПК7 А61В 17/36.
5. Полонский Ю.З., Холявин А.И., Мартынов Б.В., Парфенов В.Е., Труфанов В.Е. Безрамная расчетная магнитно-резонансная томография со стереотаксическими манипуляторами класса «Ореол». *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2009; 4 (28): 71–8. [Polonskiy Yu.Z., Kholyavin A.I., Martynov B.V., Parfenov V.E., Trufanov V.E. Use of stereotactic manipulators of the Oreol class for frameless stereotactic magnetic resonance imaging. *Vestnik Rossiyskoy Voenno-Meditsinskoy Akademii (Herald of Russian Military Medical Academy, Russian journal)*. 2009; 4 (28): 71–8 (in Russ.).]
6. Холявин А.И., Низковолос В.Б., Аничков А.Д. Прецизионная стереотаксическая безрамная нейронавигация. *Медицинская техника*. 2016; 4: 26–8. [Kholyavin A.I., Nizkovolos V.B., Anichkov A.D. Precision stereotactic frameless neuronavigation. *Meditsinskaya Tekhnika (Medical Equipment, Russian journal)*. 2016; 4: 26–8 (in Russ.).]
7. Гомзина Н.А., Кузнецова О.Ф. Получение L-[метил-(11С)]метионина высокой энантиомерной чистоты путем on-line-11С-метилирования L-гомоцистеинтиолактонгидрохлорида. *Биоорганическая химия*. 2011; 37: 216–22. [Gomzina N.A., Kuznetsova O.F. Preparation of [11C-methyl]-L-methionine in high enantiomeric purity by “on-line” 11C-methylation. *Bioorganicheskaya Khimiya (Bioorganic Chemistry, Russian journal)*. 2011; 37: 216–22 (in Russ.).]
8. Kunz M., Thon N., Eigenbrod S., Hartmann C., Egensperger R., Herms J. et al. Hot spots in dynamic (18) FET-PET delineate malignant tumor parts within suspected WHO grade II gliomas. *Neuro-oncology*. 2011; 13 (3): 307–16.
9. Pirotte B., Goldman S., Massager N., David P., Vandesteene A., Salmon I. et al. Comparison of 18F-FDG and 11C-methionine for PET-Guided stereotactic brain biopsy of gliomas. *J. Nucl. Med.* 2004; 45 (8): 1293–8.
10. Van Laere K., Ceyskens S., Van Calenbergh F., de Groot T., Menten J., Flamen P. et al. Direct comparison of 18F-FDG and 11C-methionine PET in suspected of glioma: sensitivity, inter-observer variability and prognosis value. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imag.* 2005; 32 (1): 39–51.
11. Kläsner B.D., Krause B.J., Beer A.J., Drzezga A. PET imaging of gliomas using novel tracers: a sleeping beauty waiting to be kissed. *Expert Rev. Anticancer. Ther.* 2010; 10 (5): 609–13.
12. Hariz M.I. CT scanning in stereotactic neurosurgery. In: Gildenberg P.L., Tasker R.R. (eds.) *Textbook of stereotactic and functional neurosurgery*. New-York: McGraw-Hill; 1998: 265–70.
13. Simon S.L., Douglas P., Baltuch G.H., Jaggi J.L. Error analysis of MRI and Leksell stereotactic frame target localization in deep brain stimulation surgery. *Stereotac. Functional Neurosurg.* 2005; 83 (1): 1–5.
14. Yu C., Apuzzo M.L., Zee C.S., Petrovich Z. A phantom study of the geometric accuracy of computed tomographic and magnetic resonance imaging stereotactic localization with the Leksell stereotactic system. *Neurosurgery*. 2001; 48 (5): 1092–8.
15. Mori Y., Hayashi N., Iwase M., Yamada M., Takikawa Y., Uchiyama Y. et al. Stereotactic imaging for radiosurgery: localization accuracy of magnetic resonance imaging and positron emission tomography compared with computed tomography. *Stereotact. Functional Neurosurg.* 2006; 84 (4): 142–6.
16. Kuhn S.A., Romeike B., Walter J., Kalff R., Reichart R. Multiplanar MRI-CT fusion neuronavigation-guided serial stereotactic biopsy of human brain tumors: proof of a strong correlation between tumor imaging and histopathology by a new technical approach. *J. Cancer Res. Clin. Oncol.* 2009; 135 (9): 1293–302.
17. Низковолос В.Б., Холявин А.И., Гурчин А.Ф. Практические аспекты использования совмещенной МСКТ-ПЭТ в стереотаксической нейроонкологии. *Российский нейрохирургический журнал им. профессора А.Л. Поленова*. 2012; 4 (2): 16–9. [Nizkovolos V.B., Kholyavin A.I., Gurchin A.F. The practical aspects of using the combined CT-PET in stereotactic neuro-oncology. *Rossiyskiy Neyrokhirurgicheskiy Zhurnal imeni professora A.L. Polenova (Russian Neurosurgery Journal named after A.L. Polenov)*. 2012; 4 (2): 16–9 (in Russ.).]
18. Guihong Q., Dali Z., Pingfan Y. Medical image fusion by wavelet transform modulus maxima. *Optics Express*. 2001; 9 (4): 184–90.
19. Ganasala P., Kumar V. CT and MR image fusion scheme in nonsubsampling contourlet transform domain. *J. Digital Imag.* 2014; 27 (3): 407–18.

Поступила 30.06.2017

Принята к печати 14.07.2017