

ТЕХНОЛОГИИ ПЛОСКОДЕТЕКТОРНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ В НЕЙРООНКОЛОГИИ: ОПЫТ НМИЦ ОНКОЛОГИИ ИМ. Н.Н. ПЕТРОВА

Курносков И.А.¹✉, Балахнин П.В.^{1,2}, Гуляев Д.А.^{1,3,4}, Ханевич М.Д.², Субботина Д.Р.¹, Малькевич В.И.¹, Шмелев А.С.¹, Ромашкина Д.С.¹, Осипова Н.В.¹

¹ Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н. Н. Петрова Минздрава России; Россия, 197758, Санкт-Петербург, пос. Песочный, ул. Ленинградская, 68

² Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет Минздрава России; Россия, 194100, Санкт-Петербург, ул. Литовская, 2

³ Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова Минздрава России; Россия, 197341, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, 2

⁴ Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова Минздрава России; Россия, 195067, Санкт-Петербург, Пискаревский проспект, 47

✉ Курносков Иван Александрович, ivkurnosov@gmail.com, +7 (951) 651-44-56

РЕФЕРАТ

Актуальность: Рост заболеваемости опухолями центральной нервной системы увеличивает потребность в точных и мало-травматичных технологиях интраоперационной визуализации и навигации. Плоскодетекторная компьютерная томография (ПДКТ) позволяет получать объемные и кроссекционные КТ-изображения непосредственно в рентгеноперационной и сочетать их с рентгеноскопией и навигацией.

Цель: Оценить возможности и основные направления применения ПДКТ в нейроонкологии на основании опыта одного специализированного центра.

Материалы и методы: Проведен одноцентровый ретроспективно-описательный анализ 207 интервенционных вмешательств, выполненных у 207 пациентов в НМИЦ онкологии им. Н.Н. Петрова в период с ноября 2021 по декабрь 2025 г. Процедуры выполнялись на ангиографической системе Artis Zee Floor (Siemens). Статистическую обработку проводили с использованием Microsoft Excel 2016 и STATISTICA 12.

Результаты: Медианный возраст пациентов составил 58 (45; 69) лет; мужчин было 95, женщин — 112. ПДКТ применялась при стереотаксической биопсии опухолей головного мозга (n = 159), диагностической церебральной ангиографии (n = 14), дренировании опухолевых кист (n = 11), имплантации резервуара Оммая (n = 7), вентрикуло-перитонеальном шунтировании (n = 6), вертебропластике (n = 5), дренировании абсцессов головного мозга (n = 3) и предоперационной эмболизации менингиомы (n = 2). Технология обеспечивала актуальную интраоперационную 3D-визуализацию, навигационное планирование, контроль положения инструмента и немедленную оценку результата вмешательства. Наиболее убедительные преимущества отмечены при стереотаксической биопсии опухолей головного мозга.

Выводы: ПДКТ является перспективной универсальной интраоперационной платформой для минимально-инвазивных вмешательств в нейроонкологии. Ее применение повышает точность, управляемость и безопасность процедур; наиболее обоснованным на данном этапе представляется использование метода при стереотаксической биопсии опухолей головного мозга.

Ключевые слова: плоскодетекторная компьютерная томография, нейроонкология, нейрохирургия, стереотаксическая биопсия, интраоперационная визуализация, нейронавигация, интервенционная радиология

Для цитирования: Курносков И.А., Балахнин П.В., Гуляев Д.А., Ханевич М.Д., Субботина Д.Р., Малькевич В.И., Шмелев А.С., Ромашкина Д.С., Осипова Н.В. Технологии плоскодетекторной компьютерной томографии в нейроонкологии: опыт НМИЦ онкологии им. Н.Н. Петрова. Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2026;9(2):72-83.
<https://doi.org/10.37174/2587-7593-2026-9-2-72-83>

FLAT-DETECTOR COMPUTED TOMOGRAPHY TECHNOLOGIES IN NEURO-ONCOLOGY: THE EXPERIENCE OF THE N.N. PETROV NATIONAL MEDICAL RESEARCH CENTER OF ONCOLOGY

Ivan A. Kurnosov¹✉, Pavel V. Balakhnin^{1,2}, Dmitry A. Gulyaev^{1,3,4}, Mikhail D. Khanevich², Darya R. Subbotina¹, Vasili I. Malkevich¹, Alexey S. Shmelev¹, Darya S. Romashkina¹, Nadezhda V. Osipova¹

¹ N.N. Petrov National Medicine Research Center of Oncology; 68 Leningradskaya Str., Pesochny, Saint Petersburg, Russia 197758

² Saint Petersburg State Pediatric Medical University; 2 Litovskaya Str., Saint Petersburg, Russia 194100

³ V.A. Almazov National Medical Research Center; 2 Akkuratov Str., Saint Petersburg, Russia 197341

⁴ I.I. Mechnikov North-Western State Medical University; 47 Piskarevsky Prospekt, Saint Petersburg, Russia 195067

✉ Ivan A. Kurnosov, ivkurnosov@gmail.com, +7 (951) 651-44-56

ABSTRACT

Relevance: The growing burden of central nervous system tumors increases the need for accurate and minimally invasive intraoperative imaging and navigation technologies. Flat-detector computed tomography (FDCT) provides volumetric and cross-sectional CT-imaging directly in the angiography suite and can be integrated with fluoroscopy and navigation.

Purpose: To assess the capabilities and principal applications of flat-detector computed tomography in neuro-oncology based on the experience of a single tertiary cancer center.

Materials and methods: A single-center retrospective descriptive analysis included 207 interventional procedures performed in 207 patients at the N.N. Petrov National Medical Research Center of Oncology from November 2021 to December 2025. Procedures were carried out using an Artis Zee Floor angiographic system (Siemens). Statistical analysis was performed with Microsoft Excel 2016 and STATISTICA 12.

Results: The median patient age was 58 years (45; 69); 95 patients were men and 112 were women. FDCT was used for stereotactic brain tumor biopsy (n = 159), diagnostic cerebral angiography (n = 14), drainage of tumor cysts (n = 11), Ommaya reservoir implantation (n = 7), ventriculoperitoneal shunting (n = 6), vertebroplasty (n = 5), drainage of brain abscesses (n = 3), and preoperative meningioma embolization (n = 2). The technology provided real-time intraoperative three-dimensional visualization, navigation planning, instrument position control, and immediate assessment of procedural results. The most convincing advantages were observed in stereotactic brain tumor biopsy.

Conclusions: FDCT is a promising universal intraoperative platform for minimally invasive neuro-oncological procedures. Its use may improve procedural accuracy, controllability, and safety, with the strongest current rationale seen for stereotactic brain tumor biopsy.

Key words: flat-detector computed tomography, neuro-oncology, neurosurgery, stereotactic biopsy, intraoperative imaging, neuronavigation, interventional radiology

For citation: Kurnosov I.A., Balakhnin P.V., Gulyaev D.A., Khanevich M.D., Subbotina D.R., Malkevich V.I., Shmelev A.S., Romashkina D.S., Osipova N.V. Flat-Detector Computed Tomography Technologies in Neuro-Oncology: The Experience of the N.N. Petrov National Medical Research Center of Oncology. Journal of Oncology: Diagnostic Radiology and Radiotherapy. 2026;9(2):72-83. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37174/2587-7593-2026-9-2-72-83>

Введение

Заболеваемость опухолями центральной нервной системы увеличивается в связи с увеличением продолжительности жизни и повышением доступности диагностики. По данным GLOBOCAN 2022, в мире ежегодно регистрируется 321 731 новый случай опухолей головного мозга и других отделов ЦНС и 248 500 смертей, а 5-летняя распространенность этой группы заболеваний составляет около 1,2 млн пациентов. Анализ данных GBD 2021 показывает, что в период с 1990 по 2021 г. абсолютное число случаев опухолей ЦНС продолжало увеличиваться: распространенность возросла на 124,5 %, а заболеваемость — на 106,5 %; при этом прогнозируется дальнейший рост глобального бремени заболевания к 2035 г. Все это означает увеличение числа пациентов, нуждающихся в повторных этапах нейровизуализации, морфологической и молекулярной верификации диагноза, ликворошунтирующих вмешательствах, катетерных и пункционных процедурах, то есть в технологиях, позволяющих выполнять такие манипуляции максимально точно и с минимальной травматизацией [1,2].

Исторически диагностика заболеваний ЦНС развивалась иначе, чем заболеваний органов, доступных непосредственной пальпации и аускультации, поскольку головной мозг и спинной мозг анатомически изолированы костными структурами черепа и позвоночного канала, а собственно внутричерепные структуры долгое время оставались недоступными для прямой визуальной оценки. Как показано в исторических обзорах, первые способы нейровизуализации начинались с рентгенографии черепа, после чего были внедрены вентрикулография (1918), пневмоэнцефалография (1919) и церебральная ангиография (1927); при этом до появления КТ оценка во многом основывалась на косвенных признаках, поскольку сама структура мозга оставалась «невидимой» [3]. Данные методы были инвазивны и нередко тяжело переносились пациентами. Появление КТ, а затем МРТ радикально изменило ситуацию, сделав возможной неинвазивную послойную оценку внутричерепных структур. В этом историческом ряду плоскодетекторная компьютерная томография (ПДКТ)

может рассматриваться как закономерный следующий этап эволюции нейровизуализации: технология переносит объемное изображение непосредственно в ангиографическую или гибридную операционную и сочетает томографическую оценку с рентгеноскопией и навигацией, что особенно важно для современных минимально-инвазивных вмешательств в нейрохирургии и нейроонкологии [3–7].

Минимально-инвазивные технологии в нейроонкологии всё чаще опираются на точные пункционные/катетерные технологии (стереотаксическая биопсия, вентрикулярные доступы, перкутанные вмешательства на позвоночнике), поскольку они позволяют снизить травматичность и ускорить получение критически важной диагностической и терапевтической информации при сохранении приемлемого уровня хирургической безопасности. При этом морфологическая и молекулярно-генетическая верификация ткани остаётся базисом современной нейроонкологии, а стереотаксические методики биопсии продолжают занимать ключевое место при труднодоступных и функционально значимых локализациях [8]. В опубликованной нами ранее серии ПДКТ-контролируемых стереотаксических биопсий на ангиографической установке показаны высокая диагностическая эффективность и возможность интраоперационной диагностики осложнений [9, 10].

Материалы и методы

В рамках рутинной клинической работы на базе отделения нейроонкологии НМИЦ онкологии им. Н.Н. Петрова проведены лечебные и диагностические вмешательства 207 пациентам с применением технологии ПДКТ. У всех пациентов было получено добровольное письменное информированное согласие на проведение вмешательства, а также согласие на последующую обработку и использование полученных данных. Процедуры проводились в рентгенохирургической операционной отделения рентгенохирургических методов диагностики и лечения (ОРХМДил) на ангиографической установке Artis Zee Floor (Siemens, Мюнхен, Германия), оснащенной плоским 16-битным цифровым детектором размерами 40×30 см. Операции проводились хирургической

бригадой, включающей врача-нейрохирурга и врача по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению (рентгенохирурга), а также абдоминального хирурга, при необходимости имплантации шунтов в брюшную полость. В послеоперационном периоде, в течение суток, выполнялось контрольное МСКТ-исследование зоны операции.

Сбор и систематизацию первичных данных проводили с использованием программного пакета Microsoft Office Excel 2016, статистическую обработку данных — STATISTICA 12 (StatSoft).

Результаты

С ноября 2021 г. по декабрь 2025 г. выполнено 207 интервенционных вмешательств под контролем ПДКТ, 207 пациентам (95 мужчин и 112 женщин). Медианный возраст больных составил 58 (45; 69) лет.

Структура манипуляций распределилась следующим образом:

Таблица 1. Структура проведенных вмешательств
Table 1. Structure of the interventions performed

Название манипуляции	n=207
Стереотаксическая биопсия новообразований головного мозга	159
Диагностическая церебральная ангиография	14
Дренажирование опухолевых кист	11
Имплантация резервуаров Оммаи	7
Вентрикуло-перитонеальное шунтирование	6
Вертебропластика	5
Дренажирование абсцессов головного мозга	3
Предоперационная эмболизация менингиомы	2

Представленные в таблице вмешательства отражают широкий спектр клинических задач, в решении которых технология ПДКТ была интегрирована в рутинную нейрохирургическую практику. Вместе с тем, каждая из указанных манипуляций имеет собственные технические особенности, стандартные подходы к выполнению и различные требования к интраоперационной визуализации. В связи с этим далее целесообразно последовательно рассмотреть основные виды вмешательств, выполненных в настоящем исследовании, с краткой характеристикой традиционных технологий их проведения и анализом тех преимуществ, которые обеспечивало применение ПДКТ в каждом конкретном случае. Такой подход позволяет более полно оценить место ПДКТ в структуре современной минимально-инвазивной нейрохирургии.

Стереотаксическая биопсия новообразований головного мозга

Стереотаксическая биопсия под контролем ПДКТ представляет собой вариант интраоперационной нейронавигации, при котором все ключевые этапы вмешательства — визуализация опухоли, планирование траектории, проведение иглы, контроль ее положения и диагностика осложнений — выполняются

непосредственно в рентгеноперационной в режиме, максимально приближенном к реальному времени. В отличие от стандартных рамных и безрамных методов, основанных преимущественно на предоперационных КТ- или МРТ-данных, ПДКТ позволяет получать актуальное объемное изображение головного мозга уже после укладки пациента, формирования доступа и даже после вскрытия твердой мозговой оболочки. Это особенно важно в ситуациях, когда меняется взаиморасположение опухоли и окружающих структур, возникает смещение мозга, выявляются новые зоны некроза или кровоизлияния, либо имеется расхождение между предоперационной нейровизуализацией и фактической интраоперационной анатомией.

Технологически метод включает выполнение одного или нескольких ПДКТ-сканирований на ангиографической установке с последующей реконструкцией изображений, анализом данных в многоплоскостных режимах и построением оптимальной траектории таргетирования. При необходимости используются совмещение с данными МРТ и/или ПЭТ/КТ, а также различные варианты контрастирования, включая внутривенное и внутриартериальное многофазное усиление, что позволяет лучше визуализировать жизнеспособную опухолевую ткань, питающие сосуды, зоны некроза и смежные критические структуры. После построения траектории ее координаты передаются в навигационное пространство ангиографической системы, а проведение иглы осуществляется под контролем лазерного наведения и дополненной рентгеноскопии в двух ортогональных проекциях. После забора материала выполняется контрольное ПДКТ-сканирование, позволяющее сразу оценить точность попадания в целевую зону и исключить либо своевременно диагностировать геморрагические осложнения.

Основное преимущество ПДКТ-контролируемой биопсии по сравнению с обычными рамными и безрамными биопсиями заключается в устранении их принципиального ограничения — «слепого» продвижения иглы. При стандартной стереотаксической биопсии хирург ориентируется на заранее рассчитанную траекторию, однако не видит ни фактического положения иглы в ткани мозга, ни возможного смещения анатомических ориентиров, ни момента развития осложнения. ПДКТ, напротив, делает возможным прямой интраоперационный контроль положения иглы и при необходимости немедленную коррекцию ее хода. Это особенно важно при небольших, глубинных, гетерогенных или частично некротизированных новообразованиях, где даже минимальная ошибка может привести к неинформативному забору ткани.

Еще одним важным преимуществом является повышение безопасности процедуры. Поскольку наиболее тяжелые осложнения стереотаксической биопсии связаны прежде всего с внутрипроцедур-

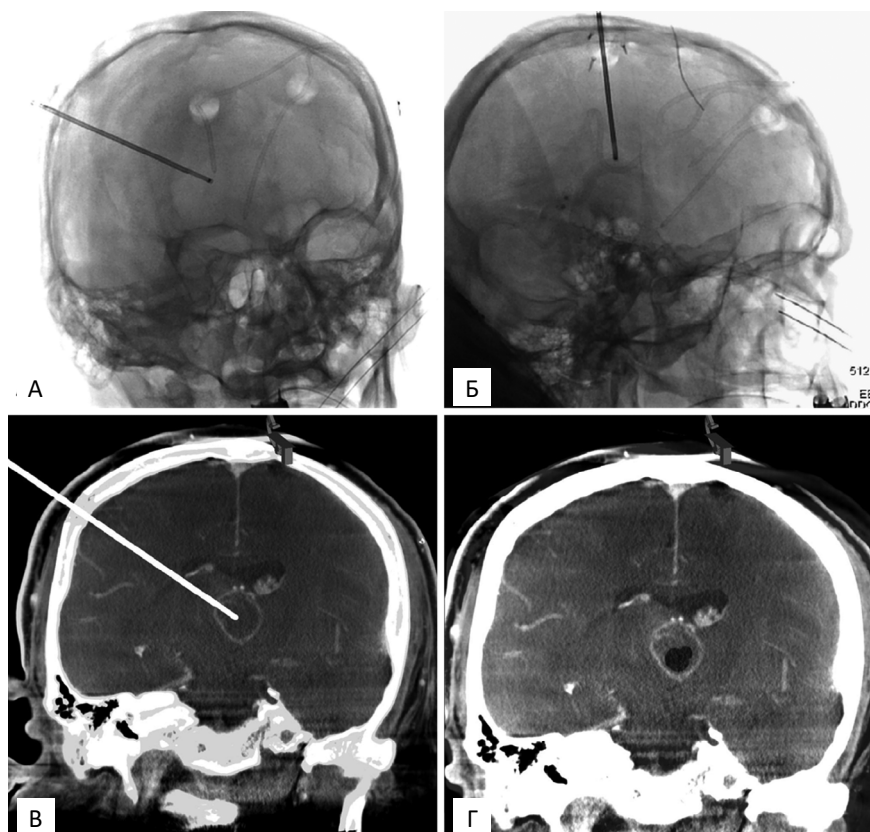


Рис. 1. А, Б — этапы проведения стереотаксической биопсии головного мозга с использованием режима дополненной рентгеноскопии; В, Г — этапные ПДКТ-сканирования во время выполнения биопсии.

А и Б — промежуточное положение биопсийной иглы, которая проводится под контролем рентгеноскопии в двух взаимно перпендикулярных проекциях. В — конечное положение иглы, полученное с помощью ПДКТ-сканирования и совмещения с изображением, полученным в начале манипуляции. Г — в центральной части отчетливо виден пузырек воздуха, который сформировался после забора материала из целевой точки

Fig. 1. А, Б — stages of a stereotactic brain biopsy using augmented fluoroscopy; В, Г — staged FDCT scans during the biopsy: А and Б — the intermediate position of the biopsy needle, which is inserted under fluoroscopy guidance in two mutually perpendicular projections. В — the final position of the needle obtained using FDCT scanning and fused with the image obtained at the beginning of the procedure. Г — in the central part, an air bubble that formed after sample collection from the target point is clearly visible

ными кровоизлияниями, возможность их немедленной визуализации непосредственно после извлечения иглы имеет принципиальное значение. В отличие от обычной биопсии, где для послеоперационного контроля часто требуется транспортировка пациента в КТ-кабинет, ПДКТ позволяет выявить кровотечение сразу в рентгеноперационной и без промедления перейти к необходимому лечению. Дополнительным достоинством метода является его высокая технологичность: он объединяет нейровизуализацию, навигацию и контроль результата в одной среде, уменьшает зависимость нейрохирурга от внешнего подразделения лучевой диагностики и делает весь рабочий процесс более логичным, управляемым и воспроизводимым. Таким образом, ПДКТ-контролируемая биопсия представляет собой не просто модификацию существующих стереотаксических технологий, а качественно иной подход к выполнению минимально-инвазивной морфологической верификации опухолей головного мозга [9].

Диагностическая церебральная ангиография

По сравнению с обычной цифровой разностной ангиографией (DSA), диагностическая ангиография, дополненная плоскодетекторной компьютерной томографией, обеспечивает существенно более полное представление о пространственной анатомии опухоли и питающего ее сосудистого русла. Если стандартная DSA остается методом оценки гемодинамики и последовательности контрастирования сосудов в двумерных проекциях, то ПДКТ позволяет получить трехмерный объем с высоким пространственным разрешением, визуализировать не только артерии, но и их взаимоотношение с опухолью, костными структурами основания черепа, паренхимой мозга и венозными коллекторами. Это особенно важно для пациентов с менигиомами и другими гиперваскулярными образованиями, когда необходимо точно различать питающие ветви, оценивать участие сосудов из разных артериальных бассейнов и выявлять потенциально опасные анастомозы между

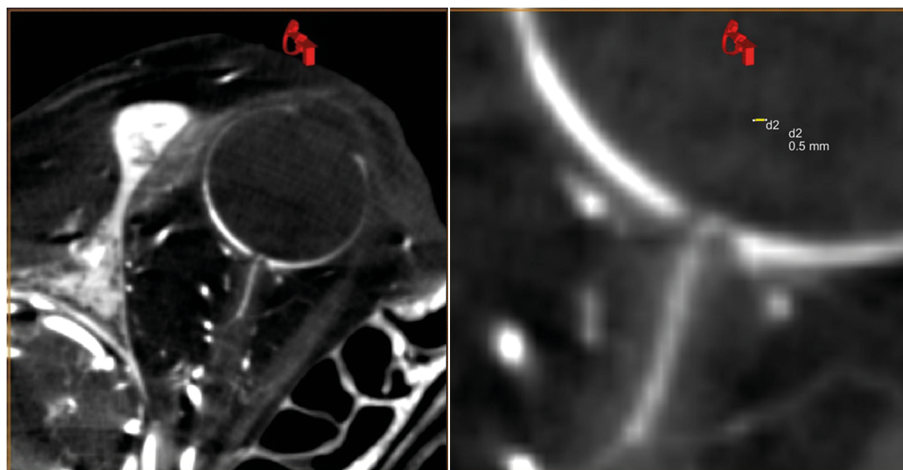


Рис. 2. ПДКТ-ангиограммы с использованием методики внутриартериального болюсного контрастирования. На правом рисунке представлен аксиальный срез, проходящий через плоскость зрительного нерва. На левом рисунке отчетливо видна центральная артерия сетчатки, которая имеет калибр порядка 0,5 мм. Применение методики возможно для диагностики наличия тромбоза данной артерии при острой амблиопии

Fig. 2. FDCT angiograms using intra-arterial bolus contrast. The right image shows an axial section through the optic nerve. The left image clearly shows the central retinal artery, which has a diameter of approximately 0.5 mm. This technique can be used to diagnose thrombosis of this artery in acute amblyopia

системами наружной и внутренней сонных артерий. Также за счет высокой разрешающей способности появляется возможность визуализировать сосуды крайне малого калибра, например, центральную артерию сетчатки (рис. 2).

В нашей практике диагностическая ПДКТ-ангиография используется для дифференциального диагноза между типами сосудистых новообразований (кавернозная ангиома, артериовенозная мальформация), визуализации сосудистых опухолей перед разметкой для проведения лучевой терапии, а также для уточнения сосудистой анатомии гиперваскулярных опухолей перед их хирургическим удалением (рис. 3, 4).

Дренирование опухолевых кист и абсцессов

Дренирование опухолевых кист под контролем ПДКТ представляется более удобным, поскольку эта технология объединяет в одной рентгеноперационной все ключевые этапы вмешательства: получение актуального трехмерного изображения, планирование безопасной траектории, проведение иглы под навигационным контролем и немедленную проверку результата. В отличие от подходов, основанных только на предоперационных МРТ/КТ-данных, ПДКТ позволяет ориентироваться не на «статическую» анатомию, а на фактическую интраоперационную ситуацию после укладки пациента и формирования

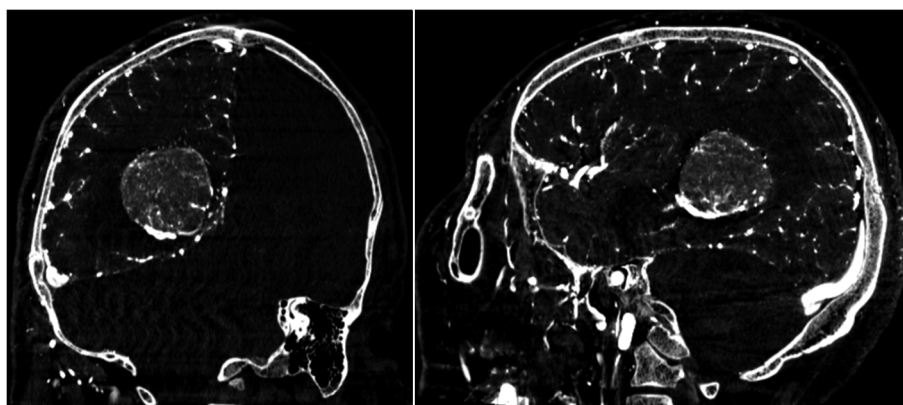


Рис. 3. ПДКТ-ангиограммы внутрижелудочковой менингиомы с применением селективного внутриартериального контрастирования. На правом и левом рисунках представлены фронтальная и сагиттальная проекции ПДКТ-сканов менингиомы. Помимо визуализации опухоли хорошо видны питающие сосуды и пути венозного дренажа. Эти данные используются для планирования открытого хирургического вмешательства, позволяя на ранних этапах деваскуляризовать новообразование

Fig. 3. FDCT angiogram of an intraventricular meningioma using selective intra-arterial contrast. The right and left figures show coronal and sagittal views of FDCT scans of a meningioma. In addition to visualizing the tumor, the feeding vessels and venous drainage pathways are clearly visible. This data is used for planning open surgery, allowing for early devascularization of the tumor

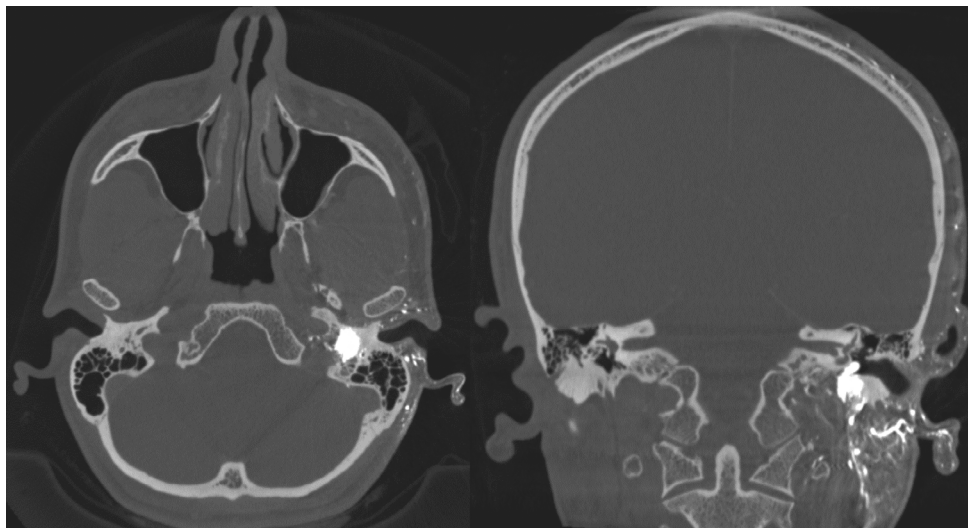


Рис. 4. ПДКТ-ангиограмма, полученная с применением суперселективной ангиографии из ветвей левой наружной сонной артерии. На изображениях отчетливо видна парагангиома, расположенная в пирамиде левой височной кости и питающие её ветви наружной сонной артерии

Fig. 4. FDCT-angiogram obtained using superselective angiography of the branches of the left external carotid artery. The images clearly show a paraganglioma located in the pyramid of the left temporal bone and the branches of the external carotid artery that feed it

доступа. Современные системы ангиографа и дополненная реальность при флюороскопии дают возможность совмещать виртуально построенную траекторию с рентгеноскопией и контролировать продвижение инструмента в режиме реального времени, что особенно ценно при сложных пункционных путях. Дополнительным преимуществом ПДКТ является возможность сразу после аспирации оценить степень опорожнения кисты и исключить ранние осложнения, прежде всего кровоизлияние, без транспортировки пациента в отдельный КТ-кабинет.

Поэтому для дренирования опухолевых кист ПДКТ удобна не только как метод визуализации, но и как полноценная интраоперационная навигационная платформа, повышающая точность, воспроизводимость и безопасность вмешательства (рис. 5).

Имплантация резервуара Оммайя

Имплантация резервуара Оммайя под контролем ПДКТ имеет такие же преимущества, что и при дренировании очагов, технология объединяет все этапы в рамках одной процедуры. Для установки

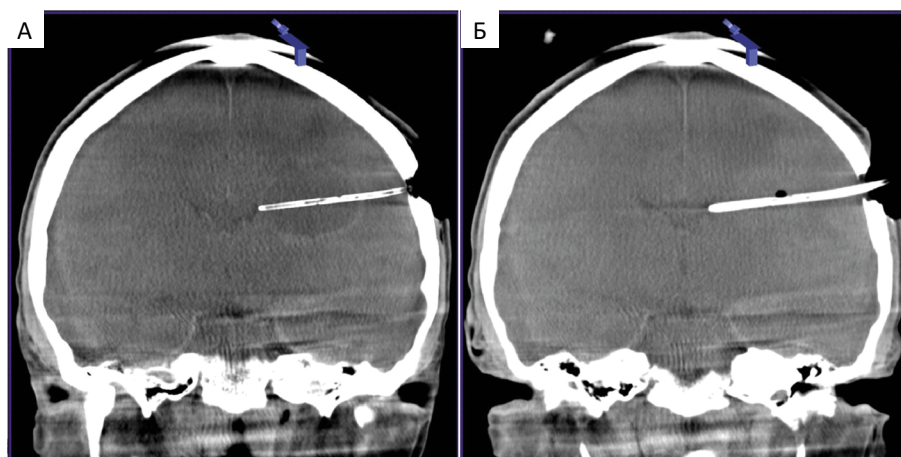


Рис. 5. Интраоперационная ПДКТ во фронтальном срезе на этапах до и после дренирования. На рисунке А изображен кистозный метастаз в левой лобной доле головного мозга, внутри которого находится дренирующий катетер. На рисунке Б видно, что жидкостная часть опухоли полностью дренирована и смещение срединных структур регрессировало

Fig. 5. Intraoperative coronal FDCT scan before and after drainage. Fig. A shows a cystic metastasis in the left frontal lobe of the brain, with a drainage catheter located within. Fig. B shows that the fluid portion of the tumor has been completely drained and the midline displacement has regressed

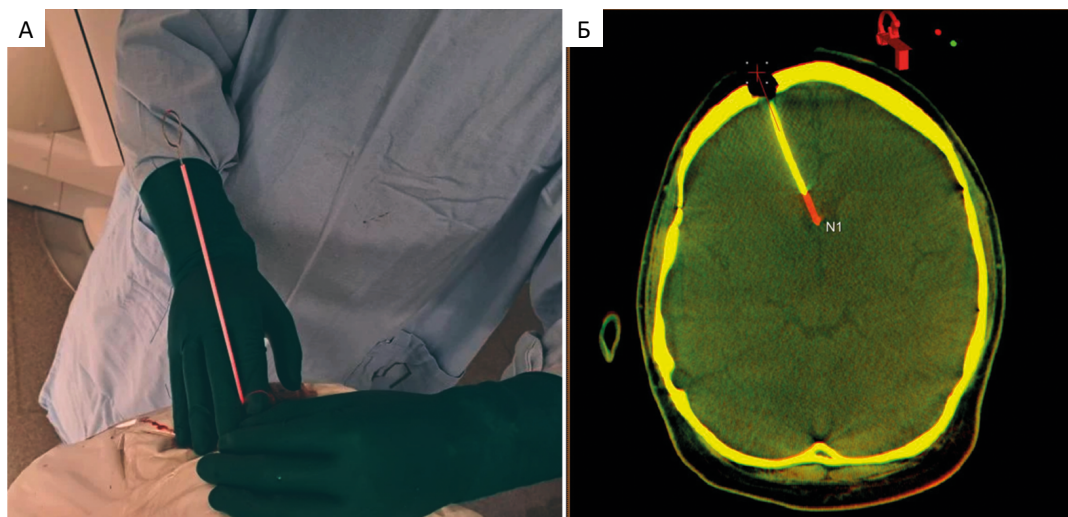


Рис. 6. Интраоперационное фото системы лазерной подсветки трассы (А) и слияние ПДКТ-сканов до и после коррекции положения вентрикулярного катетера (Б). На изображении А виден вентрикулярный катетер, по всему длиннику которого видна разметка лазерного целеуказателя, что говорит о соответствии направления импланта ранее запланированной трассе. На рисунке Б отображена промежуточная ПДКТ во время выполнения процедуры, где видно, что катетер находится в желудочковой системе (белая часть), однако для лучшего дренажа целесообразно его продвижение глубже (красная часть), что и было выполнено

Fig. 6. Intraoperative image of the laser path illumination system (A) and a fusion of FDCT-scans before and after correction of the ventricular catheter position (B). Image A shows the ventricular catheter along its entire length, with laser targeting markings visible, indicating that the implant's direction is aligned with the previously planned route. Image Б shows an intermediate FDCT scan during the procedure, showing the catheter positioned within the ventricular system (white area). However, for better drainage, it is advisable to advance it further (red area), which is what was done

резервуара Оммаи точность положения катетера принципиальна: его мальпозиция может приводить к дисфункции системы, неврологическим осложнениям и необходимости повторной операции. Именно поэтому за последние годы установка катетера по анатомическим ориентирам была во многом вытеснена различными методами визуального наведения.

В отличие от стандартной рамной или безрамной навигации, основанной главным образом на предоперационных изображениях, ПДКТ позволяет получить актуальное интраоперационное 3D-изображение уже после укладки пациента и формирования доступа, а затем сразу подтвердить реальное положение катетера в желудочке, при необходимости, провести коррекцию катетера. Это особенно ценно при узких, щелевидных или дислоцированных желудочках (рис. 6).

Вентрикуло-перитонеальное шунтирование

Имплантация вентрикулоперитонеального шунта под контролем ПДКТ обладает рядом существенных преимуществ по сравнению со стандартной установкой катетера по наружным краниометрическим ориентирам. Прежде всего, ПДКТ обеспечивает возможность интраоперационного построения индивидуализированной траектории доступа с учетом реальной анатомии желудочковой системы, степени ее деформации, смещения срединных структур, выраженности послеоперационных изменений, а также расположения кортикальных вен, борозд и

сосудистых сплетений. Это особенно важно у пациентов с узкими, асимметричными или щелевидными желудочками, при которых традиционная freehand-техника сопровождается повышенным риском мальпозиции проксимального катетера.

Принципиально важной особенностью ПДКТ-навигации является возможность безопасного использования не только стандартных точек входа, но и нестандартных доступов с проведением катетера по индивидуально рассчитанным трассам. Такой подход может быть востребован при сложной вентрикулярной анатомии, повторных вмешательствах, необходимости дренирования пострезекционных кист совместно с желудочковой системой. В этих условиях ПДКТ позволяет адаптировать траекторию к конкретной клинической ситуации, а не ограничиваться типовыми схемами катетеризации. Дополнительное значение имеет возможность немедленной интраоперационной верификации конечного положения катетера и своевременной коррекции его мальпозиции до завершения операции (рис. 7).

Вертебропластика

Вертебропластика под контролем ПДКТ сочетает объемную предоперационную оценку позвонка, навигационное планирование пункционного доступа и немедленный контроль результата в пределах одной процедуры. В отличие от стандартной рентгеноскопии, основанной на двухпроекционном

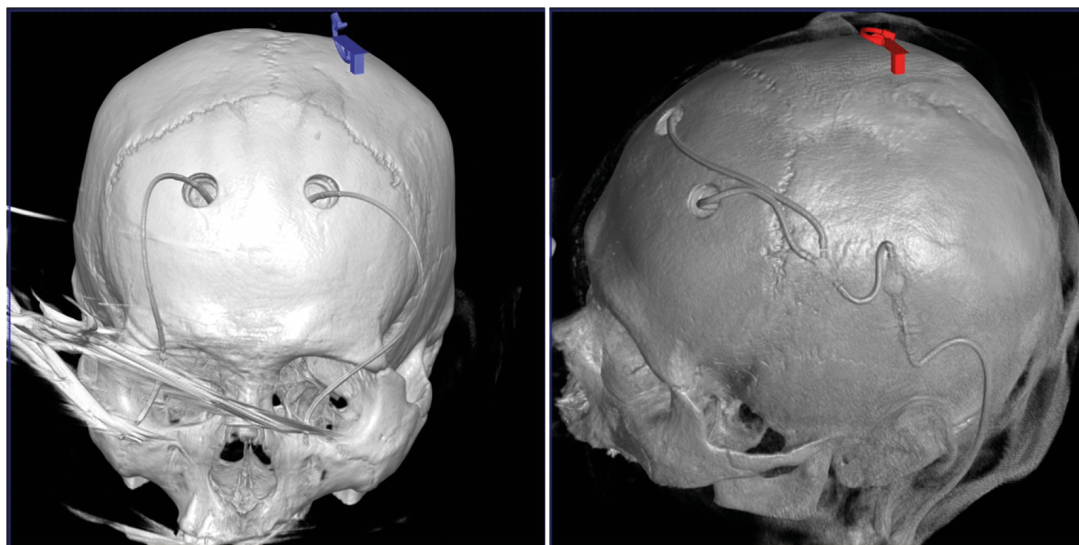


Рис. 7. Интраоперационная реконструкция ПДКТ после выполнения бивентрикулярного шунтирования. На рисунках изображены первично установленные вентрикулярные катетеры (слева), а также уже целиком собранная система (справа)

Fig. 7. Intraoperative reconstruction of the FDCT after biventricular bypass. The figures show the initially inserted ventricular catheters (left) and the fully assembled system (right)

изображении, ПДКТ позволяет детально оценить форму тела позвонка, целостность его кортикальных стенок, конфигурацию ножек дуги, распространение опухолевого или деструктивного процесса и тем самым выбрать наиболее безопасную траекторию введения иглы, в том числе при выраженной деформации позвонка или сложной анатомии. Не менее важно, что ПДКТ существенно улучшает выявление утечки цемента в позвоночный канал — ключевого осложнения вертебропластики. Использование ПДКТ при вертебропластике повышает не только точность пункционного этапа, но и безопасность всей процедуры за счет более полноценного интраоперационного контроля, позволяя оценивать расположение инструмента в таких локализациях, где за счет суммационного изображения обычной рентгеноскопии это сделать невозможно, например, позвонок Th2, который прикрыт в боковых проекциях плечевыми суставами (рис. 8).

Предоперационная эмболизация менингиомы

Предоперационная эмболизация менингиом под контролем ПДКТ представляется более удобной, поскольку эта технология существенно расширяет ангиографическую оценку опухоли за пределы стандартной двумерной DSA. Если обычная ангиография позволяет анализировать сосудистую фазность и проекционную архитектуру кровоснабжения, то ПДКТ формирует трехмерный объем, в котором могут быть детально оценены питающие артерии, интритуморозные сосудистые компартменты, соотношение опухоли с костными структурами основания черепа и пространственные взаимоотношения между ветвями из разных артериальных бассейнов. Это

особенно важно при менингиомах основания черепа и других гиперваскулярных опухолях со смешанным кровоснабжением из бассейнов наружной и внутренней сонных либо позвоночных артерий, когда именно точная идентификация источников питания определяет безопасность и полноту эмболизации (рис. 9).

Принципиальным преимуществом ПДКТ является возможность выявления тонких перитуморозных анастомозов и разграничения «опасных» питающих ветвей, эмболизация которых сопряжена с риском ишемических осложнений, поражения черепных нервов или нецелевой эмболизации [11]. Таким образом, ПДКТ при эмболизации менингиом повышает анатомическую информативность исследования, делает планирование вмешательства более индивидуализированным и способствует более безопасной деваскуляризации опухоли перед хирургическим удалением.

Обсуждение

Преимущества использования ПДКТ для стереотаксической биопсии опухолей головного мозга, как и возможные варианты внутриартериального и внутривенного контрастирования при ее проведении были обсуждены нами ранее в другой работе [9]. Здесь же следует отметить, что ПДКТ имеет те же преимущества и при проведении лечебных минимально-инвазивных нейрохирургических вмешательств. Связано это с тем, что ПДКТ-технологии обеспечивают интраоперационную 3D-визуализацию “здесь и сейчас”, то есть КТ-подобный объем непосредственно на ангиографическом столе/в гибридной операционной без транспортировки пациента,

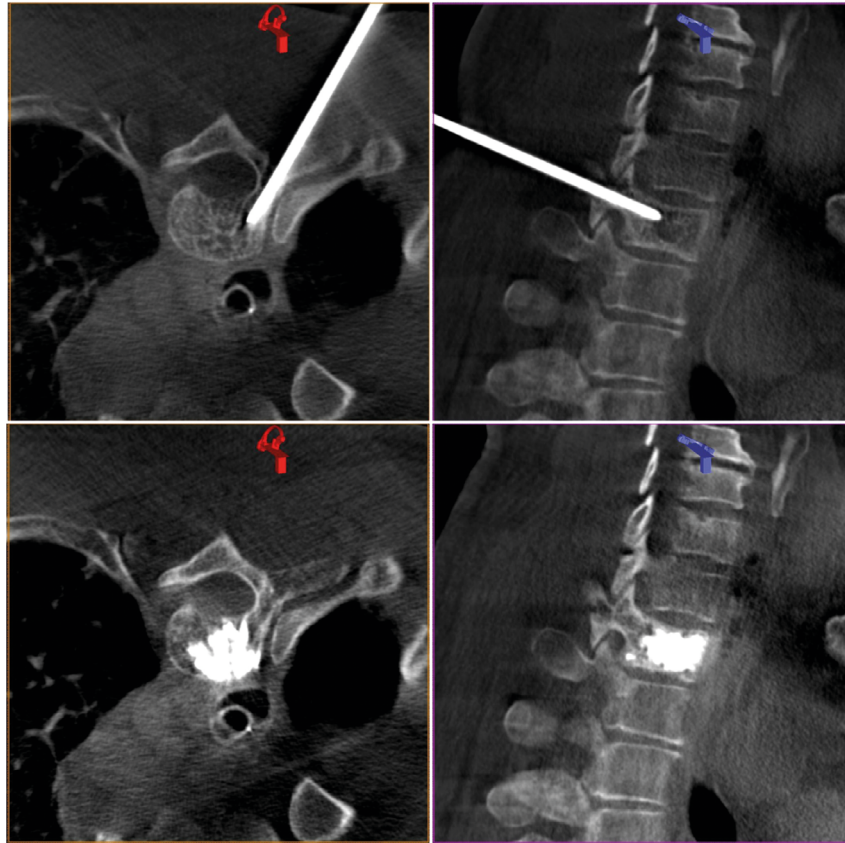


Рис. 8. Интраоперационная ПДКТ на этапах введения иглы (сверху) и заключительного контроля. На верхних снимках представлены сканы, выполненные для оценки позиционирования иглы для вертебропластики, она расположена в теле гемангиомы. На нижних снимках отображен этап контроля для с оценкой заполнения гемангиомы тела позвонка Th2

Fig. 8. Intraoperative FDCT scan during needle insertion (top) and final checkup. The top images show scans taken to assess the positioning of the vertebroplasty needle, which is located within the body of the hemangioma. The bottom images show the checkup phase to assess the filling of the hemangioma in the Th2 vertebral body

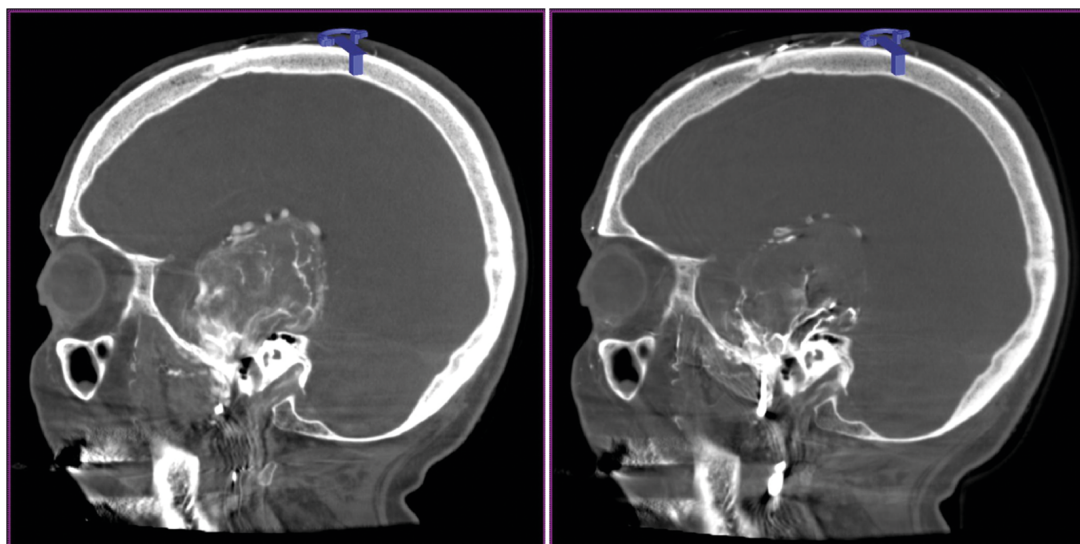


Рис. 9. ПДКТ-ангиограммы менингиомы в области средней черепной ямки до и после выполнения предоперационной эмболизации. На левом снимке отражен этап до проведения эмболизации, хорошо визуализируется сосудистая сеть опухоли. На снимке справа контрольная ангиограмма, где отсутствует заполнение внутритуморальных сосудов

Fig. 9. FDCT angiograms of meningioma in the middle cranial fossa before and after preoperative embolization. The left image shows the stage before embolization, clearly demonstrating the tumor's vascular network. The right image shows a control angiogram, which shows no intratumoral vessel filling

потери времени и нарушения стерильного контура операционной. В ранних публикациях о клиническом опыте использования ПДКТ в нейроэндокринологических процедурах ключевым преимуществом считалась возможность немедленно выявлять и исключать внутричерепные осложнения без транспортировки пациента в отдельный КТ-кабинет [12]. Для манипуляций с использованием рентген-контрастных инструментов (катетеры, иглы, импланты) решающим становится не только планирование траектории, но и мгновенная верификация результата: например, ранее была продемонстрирована выполнимость установки наружного вентрикулярного дренажа в рентгеноперационной с интеграцией ПДКТ и флюороскопической навигации [13]. Аналогичная логика реализована в гибридной технике вентрикуло-перитонеального шунтирования под интраоперационной рентгеноскопией и ПДКТ, ориентированной на повышение точности позиции желудочкового катетера [14].

По сравнению с УЗ-навигацией, ПДКТ менее зависит от акустического окна и вариабельности ультразвуковой визуализации и даёт воспроизводимую объёмную картину конечного положения инструмента, что особенно актуально при узких или смещённых желудочках и при необходимости коррекции положения катетера до завершения операции [15,16]. В сравнении с интраоперационной МРТ, ПДКТ проще интегрируется в реальную клиническую практику, так как не требует МР-совместимых инструментов и специализированной «немагнитной» инфраструктуры, тогда как МРТ-ориентированные манипуляции остаются ресурсоемкими и могут применяться в узкоспециализированных клинических ситуациях [8]. При сопоставлении ПДКТ с изолированной рентгеноскопией, ограниченной двумерной природой, современные протоколы ПДКТ и 3D-ангиографии расширяют анатомическую информативность при ангиографических вмешательствах и поддерживают более точное принятие решений при сложной сосудистой анатомии [17]. Это особенно важно для предоперационной эмболизации опухолей оболочек мозга, зоны головы и шеи, где ПДКТ-совмещение визуализирует питающие ветви из разных артериальных бассейнов и потенциально опасные анастомозы между бассейнами наружной и внутренней сонных артерий [18].

Представленный опыт демонстрирует, что ПДКТ может использоваться в нейроонкологии не только как дополнительный метод интраоперационной визуализации, но и как универсальная технологическая платформа, объединяющая функции предоперационного планирования, навигации, контроля положения инструмента, немедленной оценки результата вмешательства и ранней диагностики осложнений. В рамках настоящей серии ПДКТ применялась при 207 интервенционных процедурах различного профиля, включая стереотаксические

биопсии, вентрикулярные доступы, дренирование опухолевых кист, вертебропластику, диагностическую церебральную ангиографию и предоперационную эмболизацию менингиом. Такой спектр вмешательств свидетельствует о высокой адаптивности метода и его потенциальной роли в структуре современной минимально-инвазивной нейрохирургии.

Наиболее значимый массив наблюдений в данном исследовании относится к стереотаксической биопсии новообразований головного мозга, что позволяет рассматривать именно это направление как основное доказательное основание для оценки клинической эффективности ПДКТ. Применительно к биопсийным вмешательствам преимущества технологии представляются наиболее очевидными: ПДКТ позволяет получать актуальную интраоперационную трехмерную информацию, учитывать возможные изменения размеров, формы и структуры опухоли, а также осуществлять непосредственный контроль продвижения инструмента и своевременную диагностику геморрагических осложнений. В отличие от стандартной рамной и безрамной навигации, основанной преимущественно на предоперационных изображениях, такой подход уменьшает зависимость от «статической» анатомической модели и повышает точность манипуляций в условиях изменяющейся интраоперационной ситуации.

Вместе с тем, результаты нашего исследования следует интерпретировать с учетом того, что работа носит одноцентровый ретроспективно-описательный характер и объединяет гетерогенную группу вмешательств, существенно различающихся по задачам, технике выполнения и критериям эффективности. Распределение наблюдений было неравномерным: основную часть составили стереотаксические биопсии, тогда как по ряду других процедур накоплен пока ограниченный опыт. Тем не менее, даже на данном этапе ПДКТ представляется перспективным инструментом, способным повысить точность, управляемость и безопасность минимально-инвазивных интервенционных нейрохирургических вмешательств. Дальнейшее развитие направления связано с накоплением материала по отдельным видам операций, стандартизацией протоколов и проведением сравнительных проспективных исследований.

Заключение

Таким образом, опыт НМИЦ онкологии им. Н.Н. Петрова показывает, что ПДКТ является эффективной интраоперационной технологией, расширяющей возможности современной интервенционной нейрорадиологии вообще и интервенционной нейроонкологии в частности. Ее применение позволяет совместить трехмерную визуализацию, навигацию и контроль результатов в рамках одной процедуры, что особенно важно при вмешательствах, требующих высокой точности. Наиболее убедительные данные

получены при стереотаксической биопсии опухолей головного мозга, однако представленные результаты указывают и на перспективность использования ПДКТ при вентрикулярных доступах, дренировании кистозных образований, вертебропластике и нейроангиологических вмешательствах. ПДКТ следует рассматривать как технологию, способную занять важное место в арсенале минимально-инвазивной нейрохирургии, при условии дальнейшей клинической валидации и методической стандартизации.

Список литературы / References

- Price M, Ballard CAP, Benedetti JR, et al. CBRUS Statistical Report: Primary Brain and Other Central Nervous System Tumors Diagnosed in the United States in 2018-2022. *Neuro Oncol.* 2025;27(Suppl 4):iv1-iv66. <https://doi.org/10.1093/neuonc/noaf194>
- Yuan G, Miao D, Xu B, et al. Global, regional, and national burden of brain and other central nervous system cancers from 1990 to 2021, and projections to 2035: a systematic analysis for the global burden of disease study 2021. *Int J Surg (Lond).* 2025;112(1):286-302. <https://doi.org/10.1097/JS9.0000000000003497>
- Балахнин П.В., Багненко С.С., Беляев А.М. Плоскодетекторная компьютерная томография в интервенционной радиологии: предпосылки появления и история создания. *Медицина высоких технологий.* 2024;2(1):12-34.
Balakhnin PV, Bagnenko SS, Belyaev AM. Flat-detector computed tomography in interventional radiology: background and history of creation. *High-Tech Medicine.* 2024;2(1):12-34. (In Russ.).
- Brown TCK. Neuroradiology investigations before scanning. *Paediatr Anaesth.* 2012;22(8):826-7. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9592.2011.03778.x>
- Kyriakou Y, Richter G, Dörfler A, et al. Neuroradiologic Applications with Routine C-arm Flat Panel Detector CT: Evaluation of Patient Dose Measurements. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2008;29(10):1930-6. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A1237>
- Leeds NE, Kieffer SA. Evolution of Diagnostic Neuroradiology from 1904 to 1999. *Radiology.* 2000;217(2):309-18. <https://doi.org/10.1148/radiology.217.2.r00nv45309>
- Цибиров А.А., Бабичев К.Н., Мартынов Б.В., и др. Плоскодетекторная компьютерная томография в диагностике и лечении черепно-мозговой травмы. *Вестник неврологии, психиатрии и нейрохирургии.* 2026;(1). <https://doi.org/10.33920/med-01-2601-07>
- Tsibirov AA, Babichev KN, Martynov BV, et al. Flat-detector computed tomography in the diagnosis and treatment of traumatic brain injury. *Bulletin of Neurology, Psychiatry and Neurosurgery.* 2026;(1). <https://doi.org/10.33920/med-01-2601-07>. (In Russ.).
- Dhawan S, Chen CC. Comparison meta-analysis of intraoperative MRI-guided needle biopsy versus conventional stereotactic needle biopsies. *Neurooncol Adv.* 2023;6(1):vdad129. <https://doi.org/10.1093/oaajnl/vdad129>
- Курносов И.А., Балахнин П.В., Гуляев Д.А., и др. Плоскодетекторная компьютерная томография: новые возможности нейронавигации в режиме реального времени при проведении стереотаксической биопсии новообразований головного мозга. *Вопросы онкологии.* 2025;71(6):1245-59.
Kurnosov IA, Balakhnin PV, Gulyaev DA, et al. Flat-detector computed tomography: advancing real-time neuronavigation for stereotactic brain tumor biopsy. *Problems in Oncology.* 2025;71(6):1245-59. <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2025-71-6-OF-2310>. (In Russ.).
- Балахнин П.В., Таразов П.Г., Тюрин И.Е., и др. Плоскодетекторная компьютерная томография в интервенционной радиологии: фундаментальные принципы, современные технологии и перспективы дальнейшего развития. *Медицина высоких технологий.* 2025;3(2):5-37.
Balakhnin PV, Tarazov PG, Tyurin IE, et al. Flat-detector computed tomography in interventional radiology: fundamental principles, modern technologies and prospects for further development. *High-Tech Medicine.* 2025;3(2):5-37. (In Russ.).
- Гуляев Д.А., Белов И.Ю., Курносов И.А., и др. Риски эмболизационных технологий в хирургии доброкачественных и злокачественных опухолей основания черепа. *Сибирский онкологический журнал.* 2025;24(2):150-161.
Gulyaev DA, Belov IYu, Kurnosov IA, et al. Risks of embolization technologies in surgery for benign and malignant skull base tumors. *Siberian Journal of Oncology.* 2025;24(2):150-161. <https://doi.org/10.21294/1814-4861-2025-24-2-150-161>. (In Russ.).
- Heran NS, Song JK, Namba K, et al. The utility of DynaCT in neuroendovascular procedures. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2006;27(2):330-332.
- Fiorella D, Peeling L, Denice CM, et al. Integrated flat detector CT and live fluoroscopic-guided external ventricular drain placement within the neuroangiography suite. *J Neurointerv Surg.* 2014;6(6):457. <https://doi.org/10.1136/neurintsurg-2013-010856>
- Kobayashi S, Ishikawa T, Mutoh T, et al. A novel technique for ventriculoperitoneal shunting by flat panel detector CT-guided real-time fluoroscopy. *Surg Neurol Int.* 2012;3:119. <https://doi.org/10.4103/2152-7806.102330>
- Krause M, Lagumdžija J, Enzinger S, et al. Intraoperative cone-beam computed tomography for catheter placement verification in pediatric hydrocephalus: technical note. *Childs Nerv Syst.* 2024;40(11):3813-3816. <https://doi.org/10.1007/s00381-024-06592-5>
- Балахнин П.В., Буровик И.А., Багненко С.С. Технологии визуализации, наведения и слежения в интервенционной онкологии: современные возможности и перспективы дальнейшего развития. *Медицина высоких технологий.* 2024;2(2):5-21.
Balakhnin PV, Burovik IA, Bagnenko SS. Technologies of visualization, guidance and tracking in interventional oncology: current capabilities and prospects for further development. *High-Tech Medicine.* 2024;2(2):5-21. (In Russ.).
- Raz E, Nossek E, Sahlein DH, et al. Principles, techniques and applications of high resolution cone beam CT angiography in the neuroangiography suite. *J Neurointerv Surg.* 2023;15(6):600-607. <https://doi.org/10.1136/jnis-2022-018722>
- Yoshida K, Akiyama T, Takahashi S, et al. Cone-Beam Computed Tomography Fusion Technique for Vascular Assessment of Skull Base Meningiomas. *World Neurosurg.* 2021;151:61-69. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2021.04.065>

Information about the authors

Ivan A. Kurnosov, <https://orcid.org/0000-0003-2857-8368>
Pavel V. Balakhnin, <https://orcid.org/0000-0002-3042-6729>
Dmitry A. Gulyaev, <https://orcid.org/0000-0002-5509-5612>
Mikhail D. Khanevich, <https://orcid.org/0000-0002-6946-9689>
Darya R. Subbotina, <https://orcid.org/0000-0003-0836-4960>
Vasilii I. Malkevich, <https://orcid.org/0000-0002-1082-6071>
Alexey S. Shmelev, <https://orcid.org/0000-0002-1610-8820>
Daria S. Romashkina, <https://orcid.org/0009-0008-0664-4321>
Nadezhda V. Osipova, <https://orcid.org/0000-0002-6964-3149>

Вклад авторов

И.А. Курносов: концепция и дизайн исследования, анализ литературы, анализ и интерпретация данных, написание текста статьи.

П.В. Балахнин: концепция и дизайн исследования, анализ литературы, анализ и интерпретация данных, написание текста статьи.

Д.А. Гуляев: научное редактирование, интерпретация данных, редактирование текста.

М.Д. Ханевич: научное редактирование, интерпретация данных, редактирование текста.

Д.Р. Субботина: сбор и обработка материала, анализ клинических данных.

А.С. Шмелев: сбор и обработка материала, анализ клинических данных.

Д.С. Ромашкина: сбор и обработка материала, анализ клинических данных.

Н.В. Осипова: сбор и обработка материала, анализ клинических данных.

Финансирование

Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Балахнин П.В. является членом редакционной коллегии журнала «Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия», но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью.

Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Информированное согласие

Пациенты подписали информированное согласие на публикацию данных.

Поступила: 01.04.2026

Принята к публикации: 03.05.2026

Опубликована online: 26.06.2026

Authors' contributions

Ivan A. Kurnosov: study concept and design, literature review, data analysis and interpretation, and manuscript writing.

Pavel V. Balakhnin: study concept and design, literature review, data analysis and interpretation, and manuscript writing.

Dmitry A. Gulyaev: scientific editing, data interpretation, and manuscript editing.

Michail D. Khanevich: scientific editing, data interpretation, and manuscript editing.

Darya R. Subbotina: data collection and processing, clinical data analysis.

Alexey S. Shmelev: data collection and processing, clinical data analysis.

Darya S. Romashkina: data collection and processing, clinical data analysis.

Nadezhda V. Osipova: data collection and processing, clinical data analysis.

Funding

The study had no sponsorship.

Conflict of interests

Pavel V. Balakhnin is a member of the editorial board of the journal "Journal of oncology: diagnostic radiology and radiotherapy" but had no role in the decision to publish this article. The article has undergone the journal's established peer-review process. The authors have declared no other conflicts of interest.

Informed consent

The patients signed informed consent for the publication of the data.

Received: 01.04.2026

Accepted for publication: 03.05.2026

Published online: 26.06.2026