

© И.А. Курносов¹, П.В. Балахнин¹, Д.А. Гуляев^{1,2,3}, Д.Р. Субботина¹,
В.И. Малькевич¹, А.Л. Муравцева¹, А.С. Шмелев¹, В.Ю. Чиркин², И.А. Буровик¹,
С.С. Багненко^{1,4}, А.М. Беляев^{1,3}

Плоскодетекторная компьютерная томография: новые возможности нейронавигации в режиме реального времени при проведении стереотаксической биопсии новообразований головного мозга

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени Н.Н. Петрова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Российская Федерация

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Российская Федерация

© Ivan A. Kurnosov¹, Pavel V. Balakhnin¹, Dmitry A. Gulyaev^{1,2,3}, Darya R. Subbotina¹,
Vasilii I. Malkevich¹, Anastasia L. Muravtseva¹, Aleksei S. Shmelev¹, Vladislav Yu. Chirkin²,
Ilya A. Burovik¹, Sergey S. Bagnenko^{1,4}, Alexey M. Belyaev^{1,3}

Flat-Detector Computed Tomography: Advancing Real-Time Neuronavigation for Stereotactic Brain Tumor Biopsy

¹N.N. Petrov National Medical Research Center of Oncology, St. Petersburg, the Russian Federation

²Almazov National Medical Research Center, St. Petersburg, the Russian Federation

³North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, St. Petersburg, the Russian Federation

⁴St. Petersburg State Pediatric Medical University, St. Petersburg, the Russian Federation

Введение. Для стереотаксической биопсии (СТБ) опухолей головного мозга широко используются две технологии, основанные на принципах рамной и безрамной навигации. Недостатком обеих является отсутствие визуализации в режиме реального времени как целевой опухоли, так и устанавливаемой в нее биопсийной иглы.

Цель. Оценить техническую эффективность, безопасность, преимущества и недостатки проведения СТБ опухолей головного мозга под контролем ПДКТ (плоскодетекторной компьютерной томографии) в режиме реального времени.

Материалы и методы. В период с декабря 2021 по декабрь 2024 г. СТБ под ПДКТ-контролем выполнили 99 пациентам (46 мужчинам и 53 женщинам). Медианный возраст больных составил 56 (46; 68) лет. Операции осуществляли с использованием ангиографической установки Artis Zee Floor (Siemens, Германия), оснащенной плоским 16-битным цифровым детектором размерами 40 × 30 см с использованием различных режимов контрастирования. Анализ полученных ПДКТ-изображений производили с применением штатного программного пакета InSpace, а построение траекторий таргетирования — пакета iGuide Needle Guidance. Введение биопсийной иглы в целевую опухоль выполняли под контролем двухпроекционного лазерного наведения и режима дополненной рентгенокопии. После извлечения иглы производили контрольное

Introduction. Stereotactic brain tumor biopsy (STB) currently relies on two primary navigation technologies: frame-based and frameless systems. A significant limitation of both approaches is the inability to visualize the target tumor and biopsy needle in real-time during needle insertion.

Aim. To evaluate the technical efficacy, safety, advantages, and limitations of performing STB under real-time flat-panel detector computed tomography (FDCT) guidance.

Materials and Methods. Between December 2021 and December 2024, 99 patients (46 men, 53 women; median age 56 [46; 68] years) underwent FDCT-guided STB. Procedures were performed using an Artis Zee Floor angiographic system (Siemens, Germany) equipped with a 16-bit digital detector (40 × 30 cm) and utilizing various contrast enhancement techniques. The acquired FDCT images were analyzed using the standard InSpace software package, and trajectory planning was conducted with the iGuide Needle Guidance application. Biopsy needle insertion was performed under two-projection laser guidance and augmented fluoroscopy control. Post-procedural FDCT scans were obtained to confirm technical success and diagnose potential complications.

ПДКТ-сканирование для оценки технической эффективности забора биопсийного материала и диагностики возможных осложнений.

Результаты. Медианный объем целевой опухоли составил 6,9 (2,4; 16,6) мл, медианная длина трассы таргетирования — 47,5 (38; 56) мм. Гистологический материал был получен в 98 % случаев, в результате чего были диагностированы 62 глиальные опухоли, 25 лимфом, пять демиелинизирующих процессов, три энцефалита, один метастаз аденокарциномы без первичного очага и одна болезнь Эрлгейма — Честера. Медиана продолжительности процедуры составила 53 (43; 65) мин. Осложнения возникли у трех (3 %) пациентов в виде двух случаев внутримозговых кровоизлияний, диагностированных и устраненных во время процедуры СТБ, и одного случая стойкого неврологического дефицита. Летальных исходов не было.

Выводы. Проведенное исследование продемонстрировало высокую диагностическую эффективность и безопасность СТБ опухолей головного мозга под ПДКТ-контролем. Предложенный метод не имеет ограничений рамной и безрамной СТБ, обеспечивая надежное интраоперационное планирование траектории таргетирования, высококачественную нейровизуализацию и нейронавигацию в режиме реального времени, а также интраоперационную диагностику потенциальных осложнений с возможностью их своевременного устранения.

Ключевые слова: стереотаксическая биопсия опухолей головного мозга; нейровизуализация; нейронавигация; плоскодетекторная компьютерная томография; ПДКТ

Для цитирования: Курнос И.А., Балахнин П.В., Гуляев Д.А., Субботина Д.Р., Малькевич В.И., Муравцева А.Л., Шмелев А.С., Чиркин В.Ю., Буровик И.А., Багненко С.С., Беляев А.М. Плоскодетекторная компьютерная томография: новые возможности нейронавигации в режиме реального времени при проведении стереотаксической биопсии новообразований головного мозга. *Вопросы онкологии*. 2025. 71(6): 00-00.-DOI: 10.37469/0507-3758-2025-71-6-OF-2310

✉ Контакты: Курнос Иван Александрович, ivkurnosov@gmail.com

Введение

Биопсия с последующим гистологическим и молекулярно-генетическим исследованием играет ключевую роль в диагностике и лечении первичных опухолей головного мозга, таких как астроцитомы, глиомы [1], лимфомы [2] и др. Данная хирургическая операция может потребоваться для определения молекулярно-генетического профиля интракраниальных метастазов в случаях невыявленного первичного очага, изолированного метастатического поражения головного мозга, первично-множественного рака, а также для назначения таргетной терапии [3]. Оптимальным материалом для проведения гистологического исследования является опухолевая ткань, удаленная во время радикального открытого (или эндоскопического) хирургического вмешательства, однако показания к таким операциям ограничены солитарными резектабельными интрапаренхиматозными (или внутрижелудочковыми) новообразованиями [1]. В случаях глубоко располагающихся опухолей (базальные ганглии, ствол мозга и т. д.), опухолей, локализующихся в функционально значимых зонах

Results. The median target tumor volume was 6.9 [2.4; 16.6] ml, with a median targeting path length of 47.5 [38; 56] mm. Histological material was successfully obtained in 98% of cases, yielding diagnoses of 62 gliomas, 25 lymphomas, 5 demyelinating processes, 3 encephalitis cases, one adenocarcinoma metastasis of unknown primary, and one case of Erdheim-Chester disease. The median procedure duration was 53 [43; 65] minutes. Complications occurred in 3 (3%) patients, including two cases of intracranial hemorrhage (promptly diagnosed and managed during the procedure) and one case of persistent neurological deficit. No mortality was recorded.

Conclusion. This study demonstrates high diagnostic efficacy and safety of FDCT-guided STB. This technique overcomes the principal limitations of frame-based and frameless STB by providing reliable intraoperative trajectory planning, high-quality real-time neuroimaging and neuronavigation, and immediate complication detection with potential for timely intervention.

Keywords: stereotactic biopsy of brain tumors; neuroimaging; neuronavigation; flat-detector computed tomography; FDCT

For Citation: Ivan A. Kurnosov, Pavel V. Balakhnin, Dmitry A. Gulyaev, Darya R. Subbotina, Vasilii I. Malkevich, Anastasia L. Muravtseva, Aleksei S. Shmelev, Vladislav Yu. Chirkin, Ilya A. Burovik, Sergey S. Bagnenko, Alexey M. Belyaev. Flat-detector computed tomography: Advancing real-time neuronavigation for stereotactic brain tumor biopsy. *Voprosy Onkologii = Problems in Oncology*. 2025; 71(6): 00-00.-DOI: 10.37469/0507-3758-2025-71-6-OF-2310

(моторная кора и т. д.), при подозрении на лимфомы, а также при мультифокальном или диффузно-инфильтративном росте с целью забора материала, как правило, используют стереотаксическую (игольную) биопсию (СТБ) [1–3].

В настоящее время для проведения СТБ широко применяется два вида навигационных нейрорхирургических технологий — рамная стереотаксическая навигация (с использованием рамок Leksell (Elekta, Стокгольм, Швеция) и Cosman–Roberts–Wells (Radionics, Берлингтон, США) и безрамная навигация на основе систем оптического слежения (Stealthstation (Medtronic, Дублин, Ирландия) и BrainLAB (Brainlab, Мюнхен, Германия) [4–6].

Главным недостатком обеих технологий является то, что продвижение иглы в головном мозге и забор тканей осуществляется без непосредственного визуального контроля. Поэтому оценить правильное расположение иглы, как в опухоли, так и в критических структурах головного мозга во время процедуры, практически невозможно [1]. Смещение мозга в связи с утечкой ликвора (после вскрытия твердой мозговой оболочки (ТМО) или искривление самой иглы

в процессе ее продвижения не регистрируется и не отражается на мониторах как при использовании рамной, так и безрамной навигации [1]. В процессе проведения биопсии практически невозможно оценить потенциальные осложнения процедуры, такие как нецелевой забор ткани мозга или получение опухоли из зоны некроза (неинформативная биопсия), а также развитие кровотечения в виде внутриопухолевого кровоизлияния, внутрижелудочковой гематомы или подтекания крови по пунктирному каналу [1, 7]. Для подтверждения целевого забора ткани, а также для диагностики/исключения осложнений требуется транспортировка пациента, находящегося в наркозе, в кабинет лучевой диагностики и проведение еще одного сканирования, что затруднительно в реальной клинической практике [1].

Основными осложнениями СТБ являются неинформативный забор ткани, не позволяющий верифицировать опухоль и требующий повторного вмешательства, а также клинически значимое внутриопухолевое кровоизлияние в месте забора материала [7, 8]. В опубликованном недавно метаанализе проведено сравнение результатов рамной и безрамной биопсии опухолей головного мозга диаметром более 10 мм, которое не обнаружило статистически достоверной разницы как в диагностической ценности (от 84,0 до 100 % и от 86,6 до 100 % соответственно), так и в числе клинически значимых кровоизлияний (от 5,1 до 14,2 % и от 2,4 до 17,8 % соответственно), частоте стойкого неврологического дефицита (от 2,8 до 13,9 % и от 1,3 до 15,4 % соответственно) и смертности (от 1,2 до 3,9 % и от 1,3 до 3,6 % соответственно) между двумя навигационными технологиями [4]. В то же время известно, что эффективность СТБ напрямую зависит от размеров опухоли и глубины ее залегания. Поэтому обе технологии имеют значительно худшую диагностическую точность (и большее число осложнений) при заборе тканей из новообразований диаметром менее 10 мм (менее 1 мл), а также из опухолей с участками некроза или внутриопухолевого кровоизлияния, что позволяет верифицировать такие заболевания не более чем в 60–70 % случаев [1]. Ранее были предложены многочисленные дополнительные методики, призванные повысить информативность биопсийного материала (такие как интраоперационное цитологическое исследование, интраоперационное исследование замороженных срезов, рамановская спектроскопия, флуоресцентная микроскопия, флуоресцентная конфокальная микроскопия, многофотонная микроскопия, масс-спектрометрия и т.д.), а также снизить риск развития внутриопухолевых кровоизлияний (трансигольная эндоскопи-

ческая флюоресценция, лазерная доплеровская флоуметрия, оптическая когерентная томография, контролируемое отрицательное давление аспирации и т.д.) [3]. Также были разработаны системы роботизированного наведения, призванные повысить точность попадания в небольшие новообразования [8]. Однако все это лишь незначительно влияет на технические результаты и число осложнений, т.к. их применение не устраняет недостатки рамных и безрамных систем навигации [1]. Еще одним серьезным минусом обеих навигационных технологий является абсолютная зависимость оперирующих нейрохирургов от отделения лучевой диагностики, для которого подобные инвазивные процедуры по определению не являются приоритетными. Оснащение нейрохирургических операционных системами кроссекционной визуализации (мульти-спиральная компьютерная томография (МСКТ) и/или магнитно-резонансная томография (МРТ)) финансово крайне затратно и не способно принципиально изменить ситуацию, т.к. эти модальности предназначены, главным образом, для нейровизуализации, но не для нейронавигации в трехмерном режиме реального времени [9].

Таким образом, имеется насущная необходимость разработки новых, более надежных и практичных технологий нейровизуализации и нейронавигации в режиме реального времени, способных улучшить рабочий процесс и техническую эффективность процедур СТБ опухолей головного мозга, а также повысить их безопасность [7]. Оптимальным для этих целей представляется использование возможностей плоскодетекторной компьютерной томографии (ПДКТ) [10], входящей в состав современных ангиографических комплексов [11]. В настоящее время возможности ПДКТ-визуализации широко применяют при проведении нейрорадиологических эндоваскулярных вмешательств [12]. В то же время использование возможностей ПДКТ-нейровизуализации и большого потенциала чрескожных навигационных ПДКТ-технологий (технологий дополненной рентгеноскопии) [13] при проведении транскраниальных вмешательств в настоящее время ограничивается только установкой наружных вентрикулярных дренажей при субарахноидальном кровоизлиянии [14, 15] и дренированием спонтанных внутримозговых гематом [16].

Анализ исследований, опубликованных в электронных медицинских базах данных PubMed и РИНЦ от 15 марта 2025 г., выявил по запрашиваемым критериям поиска только одну собственную публикацию, посвященную данному методу [19]. Других работ, описывающих клиническое использование технологий ПДКТ-визуализации и ПДКТ-навигации при проведении СТБ опухо-

лей головного мозга, не отмечено. Цель исследования — оценить техническую эффективность, безопасность, преимущества и недостатки проведения СТБ опухолей головного мозга под ПДКТ-контролем в режиме реального времени.

Материалы и методы

В рамках проспективного наблюдательного исследования все процедуры СТБ опухолей головного мозга выполняли под контролем ПДКТ в режиме реального времени. Решение о проведении вмешательства принимали на мультидисциплинарном онкологическом консилиуме с участием нейрохирурга, химиотерапевта, рентгенолога, лучевого терапевта и врача по рентгенэндоваскулярной диагностике и лечению. Всем пациентам было проведено комплексное клиничко-диагностическое обследование, включавшее обязательное МРТ головного мозга с внутривенным болюсным контрастированием, 13 больным также выполняли позитронно-эмиссионную компьютерную томографию (ПЭТ-КТ) с ^{11}C -метионином или ^{18}F -фторэтилтирозином. Показаниями к проведению СТБ было подозрение на нерезектабельные первичные опухоли головного мозга (астроцитомы, олигодендроглиомы и др.) или первичную лимфому центральной нервной системы любого размера. Перед СТБ у всех пациентов было получено добровольное письменное информированное согласие на проведение вмешательства, а также согласие на последующую обработку и использование полученных данных.

Сбор и систематизацию первичных данных проводили с использованием программного пакета Microsoft Office Excel 2016, статистическую обработку данных — STATISTICA 12 (StatSoft). В ходе первичной статистической обработки критерий Шапиро — Уилка показал $p < 0,05$ для большинства переменных, что указывало на отклонение от нормального распределения. Поэтому при дальнейшем анализе применяли методы непараметрической статистики. Для оценки связи между количественными переменными использовали коэффициент корреляции Спирмена, а для сравнения групп — критерий Манна — Уитни. Статистическая значимость принималась при уровне $p < 0,05$. Количественные данные представлены в виде медианы (Me) и нижнего и верхнего квартилей (Q1–Q3).

В период с декабря 2021 по декабрь 2024 г. стереотаксическая биопсия опухоли выполнена 99 пациентам (46 мужчинам и 53 женщинам). Медианный возраст больных составил 56 (46; 68) лет.

Локализацию целевых очагов в правом полушарии наблюдали у 53 пациентов, в левом — у 38, и в мозолистом теле — у 8. При этом опухоли

располагались в теменной доле у 31 пациента, в лобной доле — у 28, базальных ганглиях — у 11, задних отделах мозолистого тела — 8, височной доле — 7, затылочной доле — 5, таламусе — 4, мозжечке — 3, и островковой доле — 2 пациентов.

В 23 случаях после наложения фрезевого отверстия диаметром 14 мм устанавливали направляющую площадку. В остальных 76 наблюдениях при проведении иглы использовали метод «свободной руки», причем в 8 случаях создавали минимально инвазивное фрезевое отверстие диаметром 2,2 мм по технологии *twist-drill*.

Все процедуры СТБ выполняли в рентгеноперационной отделении 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 одним из двух врачей-нейрохирургов, имеющих опыт работы по специальности 7 и 8 лет, а также одним из двух интервенционных радиологов (рентгенохирургов) с опытом работы 8 лет и 24 года соответственно. Во всех случаях для проведения СТБ использовали биопсийную иглу диаметром 2,1 мм с боковым забором 10 мм MDT Medtronic Navigated Biopsy Needle (Medtronic, Дублин, Ирландия).

В течение первых 24 ч после СТБ выполняли контрольную МСКТ и при отсутствии жизнеугрожающих осложнений переводили пациента из ОРИТ в отделение нейрохирургии. Выписку осуществляли на 4–5 сут после вмешательства.

При обработке данных проводился корреляционный анализ между такими параметрами, как возраст и пол пациентов, вид контрастирования, объем и локализация целевой опухоли. Также анализировали расхождение данных диагностической МРТ и интраоперационной ПДКТ по размеру и структуре таргетируемых новообразований, способ формирования доступа и использование направляющей площадки, смещение структур мозга после вскрытия ТМО, протяженность трассы таргетирования и отклонение от запланированной траектории, число пазов иглой, число ПДКТ-сканирований, число полученных столбиков ткани и общее время операции, а также число, виды, тяжесть и время осложнений, гистологический диагноз опухоли, диагностическую эффективность биопсии и длительность койко-дня.

Описание оригинального метода СТБ под ПДКТ-контролем

На первом этапе разработки метода пациентам, у которых опухоль не контрастировалась на

диагностической МРТ, процедуру СТБ проводили под контролем ПДКТ без дополнительного введения контрастного препарата. Для этого выполняли ПДКТ в режиме 10sDCT Head, после чего полученные данные объединяли путем слияния изображений с данными диагностической МРТ (изображения в режиме T2-FLAIR или T1+C) или ПЭТ–КТ с использованием программного пакета 3D/3D Fusion (Siemens, Мюнхен, Германия). Визуализацию целевого очага (из которого планировали забор ткани) и навигацию осуществляли исключительно по данным МРТ или ПЭТ–КТ (рис. 1, А), однако последующие этапы процедуры не отличались от этапов, описанных далее. У пациентов с контрастирующимися, по данным диагностической МРТ, опухолями на начальном этапе разработки метода для внутрипроцедурной визуализации использовали режим внутривенного контрастного усиления, заключавшийся в медленном (ручном) введении в периферическую вену 70–100 мл рентгеноконтрастного препарата (РКП) Йопромид (Ультравист-370, Байер, Германия) за 3–5 мин до начала первого ПДКТ-сканирования (рис. 1, Б–В). При недостаточном качестве визуализации также использовали слияние данных ПДКТ с данными МРТ и/или ПЭТ–КТ.

В дальнейшем, по мере совершенствования метода, для визуализации опухолей стали использовать преимущественно режим многофазного внутривенного болюсного ПДКТ-контрастирования. Таким образом, общий алгоритм действий при проведении СТБ заключался в следующем. После введения пациента в наркоз на ангиографическом столе его голову фиксировали стерильной клейкой лентой в положении, оптимальном для осуществления нейрохирургического доступа. После этого в периферический венозный катетер через ангиографический шприц-инжектор Mark 7 Arterior (Bayer Medrad, Лейкеркузен, Германия) вводили 9 мл РКП со скоростью 3 мл/сек и выполняли цифровую субтракционную ангиографию со скоростью 1 кадр/сек, определяя точное время начала контрастирования общих сонных артерий. Далее выполняли двухфазную ПДКТ головного мозга на фоне внутривенного болюсного введения 90 мл РКП со скоростью 3 мл/сек (введение — 30 сек), используя тот же шприц-инжектор. Первое сканирование (в артериовенозную фазу) начинали на 10 сек от момента начала контрастирования сонных артерий (т.е. через 20–30 сек от начала введения КП) и проводили в течение 20 сек в режиме 20sDCT Head; второе, аналогичное, сканирование начинали через 10 сек после окончания первого (через 50–60 сек от начала введения КП — паренхиматозная фаза). Реконструкцию полученных массивов данных осуществляли

на рабочей станции Syngo X-Workplace VD10E (Siemens, Мюнхен, Германия) в автоматическом режиме с использованием матрицы 512×512 без режимов сглаживания. Анализ полученных изображений производили с использованием программного пакета InSpace (Siemens, Мюнхен, Германия) в режимах MPR и MIP, а построение траекторий таргетирования выполняли с помощью дополнительного программного пакета iGuide Needle Guidance (Siemens, Мюнхен, Германия). Оптимальную траекторию введения биопсийной иглы определяли с учетом данных двух фаз контрастирования, объединенных в один массив с использованием опции слияния изображений 3D/3D Fusion. Для постановки первой (дистальной) точки (в месте планируемого начала «поэтажного» забора биопсийного материала) выбирали наиболее безопасный участок жизнеспособной опухолевой ткани с отчетливым (по данным паренхиматозной фазы ПДКТ) контрастированием, но не содержащий при этом (по данным артериовенозной фазы ПДКТ) крупных опухолевых сосудов. Вторую (проксимальную) точку траектории устанавливали, основываясь на анализе данных артериовенозной фазы ПДКТ таким образом, чтобы она проходила через одну из извилин мозга, минуя борозды и кортикальные вены и одновременно избегая попадания в проводящие пути, желудочки, артерии, вены и сосудистые сплетения головного мозга по всему ходу планируемого пункционного канала (рис. 2, А). В некоторых случаях кроме интраоперационных данных ПДКТ, также дополнительно использовали данные диагностической МРТ и/или ПЭТ–КТ в режиме слияния изображений. После построения траектории таргетирования ее координаты передавали в стереотаксическое пространство ангиографической установки и производили выравнивание положения ангиографического стола и С-дуги согласно заданному направлению и положению «вид сверху». При сопоставлении координат автоматически включалась лазерная подсветка в виде лазерного перекрестия, указывающая точное место входа биопсийной иглы на коже головы, а также позволяющая определить углы атаки (рис. 2, Б). Далее накладывали фрезевое отверстие, вскрывали ТМО. На первых этапах разработки метода, а также в случаях использования трудных для таргетирования траекторий дополнительно производили фиксацию к костям черепа направляющей площадки из набора Medtronic navigated biopsy needle kit (Medtronic, Дублин, Ирландия). После формирования доступа обязательно выполняли повторное ПДКТ-сканирование (здесь и далее также в режиме 20sDCT Head), соответствующее интерстициальной фазе контрастирования. С помощью полученных дан-

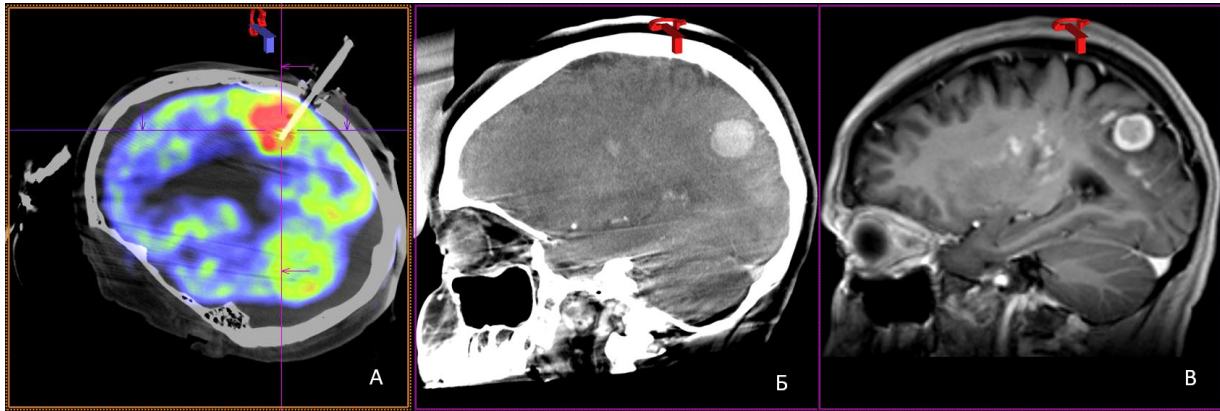


Рис. 1. А — проведение СТБ опухоли головного мозга с использованием технологии слияния двух массивов данных — данных интрапроцедурной ПДКТ без дополнительного контрастирования и данных ПЭТ-КТ с ^{11}C -метионином. Представлен этап контроля расположения биопсийной иглы в опухоли; Б — визуализация первичной лимфомы головного мозга с использованием интрапроцедурной ПДКТ на фоне внутривенного контрастного усиления (интерстициальная фаза); В — предоперационная МРТ (с многофазным внутривенным контрастированием) того же пациента в режиме T1

Fig. 1. A. Stereotactic brain tumor biopsy (STB) using fusion of two imaging datasets: intraprocedural non-contrast FDCT and ^{11}C -methionine PET-CT. The stage of biopsy needle position verification within the tumor is shown. B. Visualization of primary brain lymphoma using intraprocedural FDCT with intravenous contrast enhancement (interstitial phase). C. Preoperative MRI with multiphase intravenous contrast (T1-weighted) of the same patient

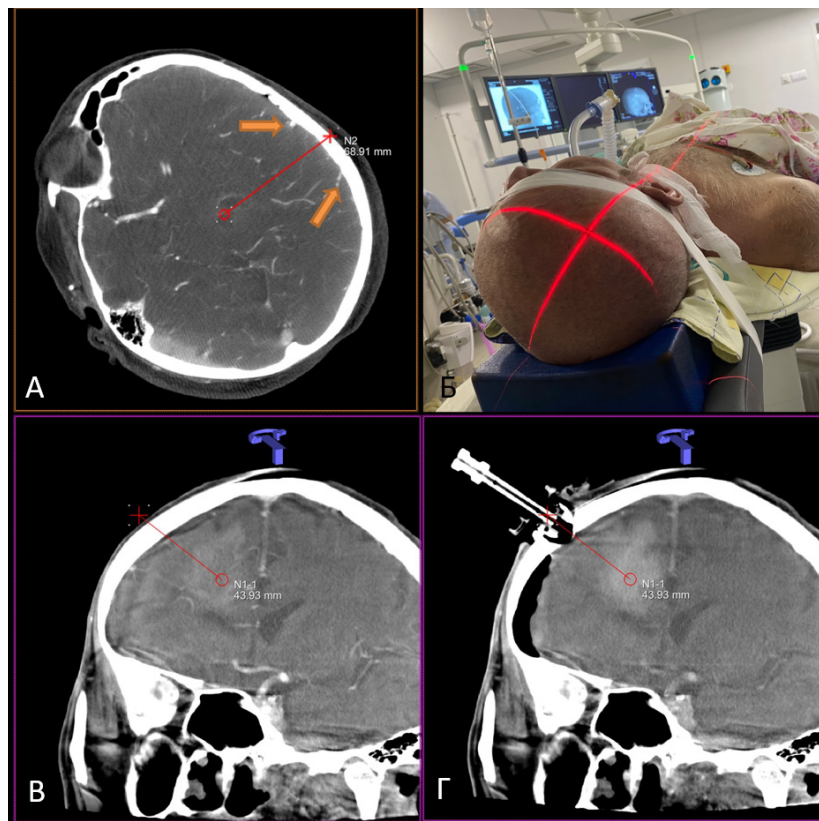


Рис. 2. А — построение траектории таргетирования опухоли с использованием интраоперационного ПДКТ в режиме многофазного внутривенного болюсного контрастирования. Представлен этап определения проксимальной точки траектории с учетом расположения кортикальных вен (оранжевые стрелки) и артерий на всем протяжении трассы (артериовенозная фаза ПДКТ-контрастирования); Б — лазерная подсветка, являющаяся штатной опцией ангиографической установки, указывает точку входа на коже головы пациента (в виде лазерного перекрестия), согласно запланированной траектории таргетирования опухоли; В–Г — значимое (для таргетирования) смещение ткани мозга и целевой опухоли после вскрытия твердой мозговой оболочки у пациента с выраженной заместительной гидроцефалией. Представлены данные паренхиматозной фазы ПДКТ с внутривенным многофазным болюсным контрастированием до осуществления доступа (В) и интерстициальной фазы ПДКТ после наложения фрезевого отверстия и установки направляющей площадки (Г)

Fig. 2. A. Planning tumor targeting trajectories using intraoperative FDCT with multiphase intravenous bolus contrast. The stage of determining the trajectory's proximal point, accounting for the location of cortical veins (orange arrows) and arteries along the entire route (arteriovenous phase of FDCT contrast), is shown. B. Laser guidance, a standard feature of the angiographic unit, indicates the entry point on the patient's scalp (via a laser crosshair) according to the planned tumor targeting trajectory. C–D. Significant displacement of brain tissue and target tumor (relevant for targeting) after dural opening in a patient with severe replacement hydrocephalus. Images show the parenchymal phase of FDCT with intravenous multiphase bolus contrast before access (C) and the interstitial phase of FDCT after burr hole creation and guide pad placement (D)

ных, а также на основе предыдущих фаз сканирования, доступных с использованием технологии 3D/3D Fusion, осуществляли коррекцию траектории таргетирования с учетом расположения фрезевого отверстия и возможного (после вскрытия ТМО) смещения структур головного мозга (рис. 2, В–Г). После этого осуществляли сегментирование целевой опухоли, обозначали границы критически важных структур, смежных с траекторией проведения иглы (рис. 3, А). Под контролем лазерного наведения, подсвечивающего две взаимно перпендикулярные плоскости по длиннику shaft иглы, осуществляли ее введение в целевой очаг с использованием техники свободной руки. Продвижение иглы в структурах головного мозга также контролировали с помощью режима дополненной рентгеноскопии, доступного в двух взаимно перпендикулярных (ортогональных) проекциях (рис. 3, Г–Д). Данная технология позволяла визуализировать в ре-

жиме реального времени и пространства саму иглу, а также (в виртуальном пространстве и не реальном времени) размеченную ранее траекторию таргетирования, сегментированную целевую опухоль, артерии и вены. В случаях использования направляющей площадки ее рабочее положение выставляли, по данным рентгеноскопии, в положении «вид сверху», после чего вводили иглу по заданному направлению (рис. 3, Б). В остальном техника процедуры не отличалась от вышеописанной техники свободной руки. После достижения целевой точки, обязательно подтверждаемой рентгеноскопией в двух ортогональных проекциях, производили многократный поэтажный забор опухолевой ткани, стремясь получить не менее 4–5 столбиков ткани. После этого иглу извлекали с предварительным введением в нее 2 мл стерильного физиологического раствора для визуализации места забора ткани по наличию в ней воздушного пузырька [20].

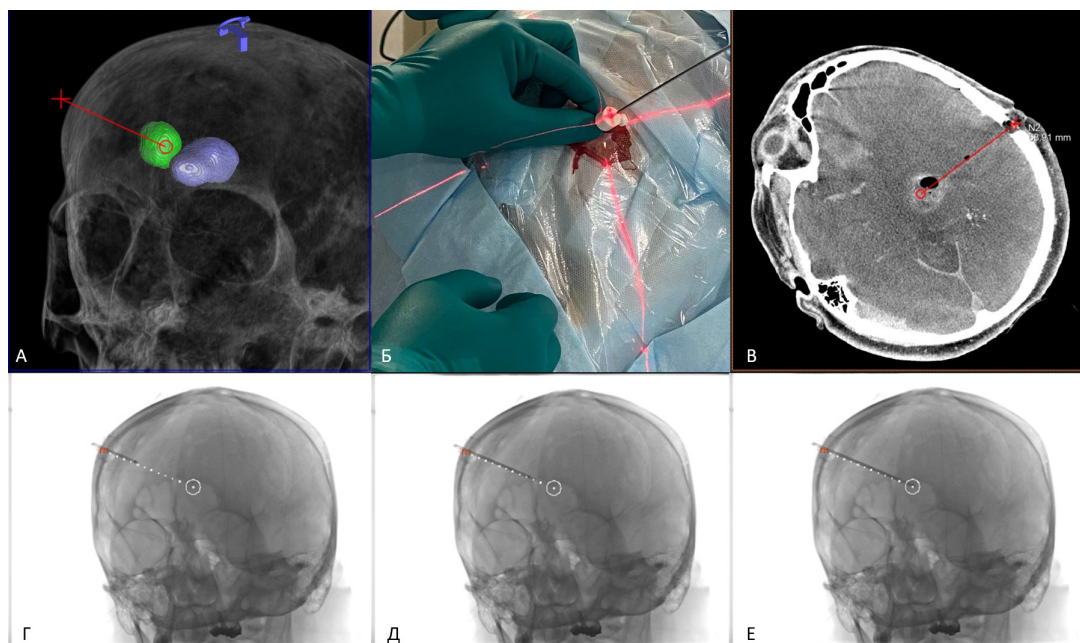


Рис. 3. А — построение траектории таргетирования опухоли с сегментированием ее в трехмерном стереотаксическом пространстве (окрашена зеленым цветом) с одновременной визуализацией прилежащего к ней правого бокового желудочка (фиолетовый цвет), проникновения, в который при заборе биопсийного материала необходимо избежать; Б — процесс определения точного направления таргетирования с использованием направляющей площадки и системы лазерного наведения. При правильном расположении площадки shaft иглы должен быть подсвечен лазером на всем своем протяжении в двух ортогональных проекциях; В — контрольная ПДКТ без дополнительного контрастирования после выполнения биопсии и извлечения биопсийной иглы. В месте забора биопсийного материала из опухоли (лимфома головного мозга) визуализируется пузырек воздуха. Данных за внутриопухолевое кровоизлияние, подтекание крови по пункционному каналу, смещение структур мозга, а также формирование гематомы в месте доступа не получено; Г–Е — этапы продвижения биопсийной иглы к целевой точке с использованием режима дополненной рентгеноскопии (дополненной реальности). На рентгеноскопическом мониторе в одной из двух взаимно-перпендикулярных проекций в реальном времени визуализируется продвигаемая игла, согласно запланированной ранее траектории таргетирования, также отражающейся на мониторе. Для более точного продвижения иглы в трехмерном пространстве С-дугу периодически необходимо переводить во вторую ортогональную проекцию также используя рентгеноскопический контроль

Fig. 3. A. Planning of the tumor targeting trajectory with its segmentation in a three-dimensional stereotaxic space (colored green) with simultaneous visualization of the adjacent right lateral ventricle (purple), penetration of which must be avoided during biopsy sampling; B. The process of determining the exact targeting direction using a guiding pad and a laser guidance system. With the correct positioning of the pad, the needle shaft should be illuminated by a laser along its entire length in two orthogonal projections; C. Control FDCT without additional contrast after performing a biopsy and removing the biopsy needle. An air bubble is visualized at the site of sampling of biopsy material from the tumor (brain lymphoma). No data were obtained for intratumor hemorrhage, blood leakage through the puncture channel, displacement of brain structures, or the formation of a hematoma at the access site; Г–Е. Stages of advancing the biopsy needle to the target point using the augmented fluoroscopy mode (augmented reality). On the fluoroscopic monitor, in one of two mutually perpendicular projections, the advancing needle is visualized in real time, according to the previously planned targeting trajectory, which is also reflected on the monitor. For more accurate advancing of the needle in three-dimensional space, the C-arm must be periodically transferred to the second orthogonal projection, also using fluoroscopic control

Через 5 мин после извлечения иглы выполняли контрольную ПДКТ без дополнительного контрастирования. С ее помощью оценивали точность забора опухолевой ткани (по локализации газового пузырька [20] (рис. 3, В), наличие кровоизлияний, их объем (рис. 4), а также возможное подтекание крови по пункционному каналу и смещение желудочков мозга (для исключения массивного внутрижелудочкового кровотечения) (рис. 5, А–Б). В случаях выявления кровоизлияний объемом более 1 мл проводили повторное сканирование через 10 мин для оценки динамики кровотечения. При отсутствии признаков продолжающегося кровотечения накладывали швы на кожную рану и переводили пациента в ОРИТ.

В ряде случаев плохой визуализации опухоли на предоперационной МРТ с внутривенным контрастированием использовали также технику внутриартериального многофазного контрастирования (рис. 5, В–Г). Для этого первым этапом через бедренный доступ выполняли катетеризацию общей сонной (или вертебральной) артерии на стороне поражения. После этого вводили в ангиографический катетер 60 мл КП со скоростью 2 мл/сек (введение 30 сек) и выполняли ПДКТ

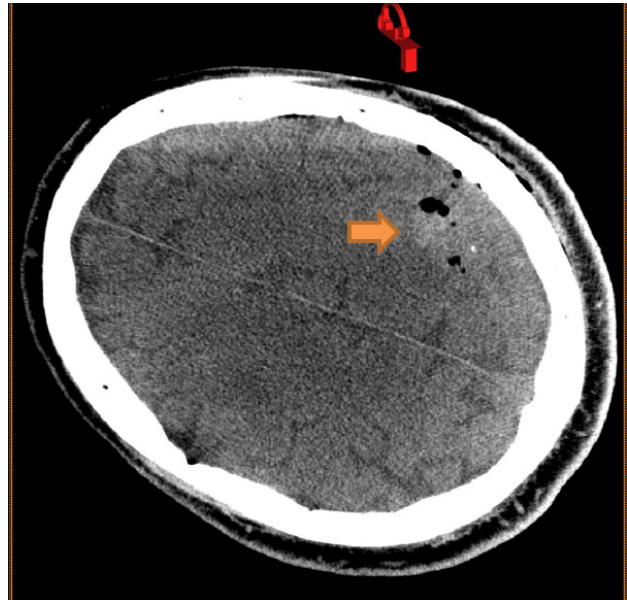


Рис. 4. Контрольная ПДКТ без дополнительного контрастирования после выполнения биопсии и извлечения биопсийной иглы. В месте забора биопсийного материала определяется внутриопухолевое кровоизлияние объёмом 1,57 мл (оранжевая стрелка)

Fig. 4. Post-procedural non-contrast FDCT following biopsy needle removal. An intratumoral hemorrhage with a volume of 1.57 ml is visible at the biopsy site (orange arrow)

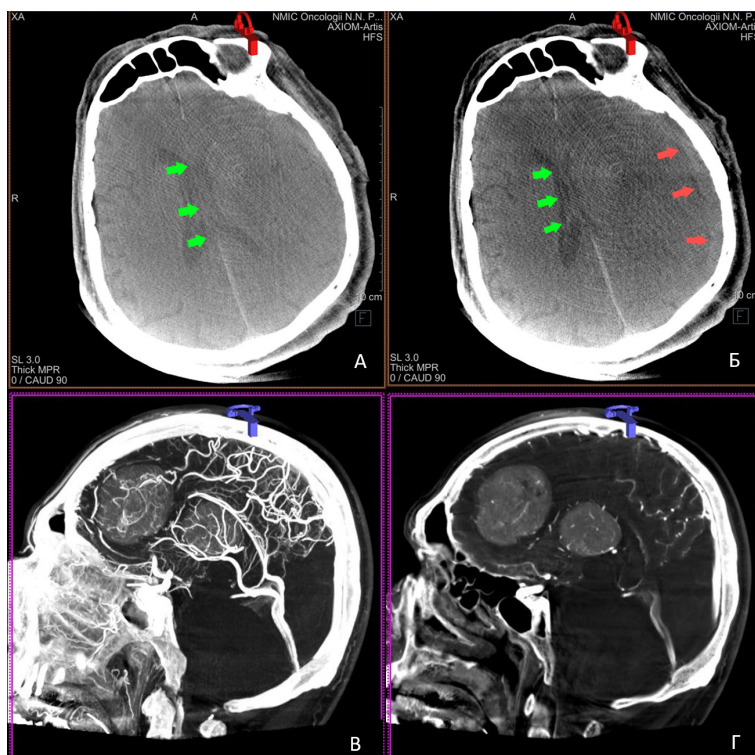


Рис. 5. А–Б — внутрипроцедурная диагностика массивного кровотечения. А — контрольная ПДКТ без дополнительного контрастирования после выполнения биопсии и извлечения биопсийной иглы. Отмечается смещение срединных структур головного мозга (зеленые стрелки); Б — вторая контрольная ПДКТ без дополнительного контрастирования через 5 мин после проведения первого исследования. Отмечается нарастание смещения срединных структур головного мозга (зеленые стрелки) с появлением субдуральной гематомы (красные стрелки); В–Г — визуализация первичной лимфомы головного мозга с использованием методики внутриартериального многофазного ПДКТ-контрастирования. Представлены артериовенозная (В) и паренхиматозная (Г) фазы исследования, выполненного в режиме 20sDCT Head (режим высокого пространственного разрешения)

Fig. 5. A–B. Intraprocedural diagnostics of massive bleeding. A. Post-procedural non-contrast FDCT following biopsy needle removal. Displacement of cerebral midline structures is noted (green arrows); B. Second non-contrast FDCT scan 5 minutes after the initial study. Progressive midline shift is observed (green arrows) with development of a subdural hematoma (red arrows); B–G. Visualization of primary brain lymphoma using intra-arterial multiphase FDCT contrast technique. Arteriovenous (B) and parenchymal (G) phases of the study performed in the 20sDCT Head mode (high spatial resolution mode) are shown

в режиме 20sDCT Head в артериовенозную фазу (сканирование через 10 сек от начала введения КП по методике, описанной в [12]) и паренхиматозную фазу (сканирование через 10 сек от момента окончания первого ПДКТ-сканирования (оригинальная методика). Остальные этапы процедуры СТБ не отличались от вышеописанной последовательности действий при использовании внутривенного многофазного болюсного контрастирования.

Результаты

Всего проведено 99 процедур стереотаксической биопсии опухоли у 99 пациентов. СТБ под контролем ПДКТ без дополнительного контрастирования проведена у 21 пациента, внутривенное контрастное усиление использовалось в 36 случаях, многофазное внутривенное — в 31, а внутриартериальное болюсное ПДКТ-контрастирование в — 11 соответственно. Медианный объем целевой опухоли, по данным предоперационной диагностики (МРТ и/или ПЭТ-КТ), составил 6,9 (2,4; 16,6) мл. Глубина залегания целевой опухоли находилась в диапазоне от 13,3 до 85,2 мм, медиана — 47,5 (38; 56) мм. В большинстве случаев достижение целевой точки было осуществимо с первого введения биопсийной иглы, а однократная коррекция траектории под контролем дополненной рентгеноскопии потребовалась только в 7 случаях (7 %). Медианное число фрагментов опухолевой ткани, полученных в процессе манипуляции, составило 5 (4; 5) шт.

При проведении интраоперационной ПДКТ с контрастированием ($n = 78$) в 11 случаях (14,1 %) отмечено уменьшение размеров очага в медианном значении на 5,0 (2,7; 9,2) мл, что составило 34,6 % уменьшения объема от первичного объема опухоли. Все эти пациенты до СТБ получали гормональную терапию в связи с подозрением на лимфому головного мозга, что и было в дальнейшем подтверждено морфологически. В 46 случаях (58,9 %), по данным ПДКТ, медиана увеличения объема опухоли составила 7,0 (2,8; 14,0) мл по сравнению с данными предоперационной лучевой диагностики (рост опухоли — на 60,0 % от исходного объема) (рис. 6). Кроме того, в 11 из этих 46 наблюдений отмечено формирование новых или увеличение существовавших зон некроза опухоли и/или внутриопухолевых кровоизлияний, что существенно влияло на план построения траектории по сравнению с ориентацией на предоперационные данные МРТ и/или ПЭТ-КТ (рис. 7).

При контрольном ПДКТ-сканировании после забора материала трехмерное радиальное отклонение от запланированной траектории таргетирования составило, в среднем, 2,5 мм (от 0,5 мм до 3,5 мм, медиана — 2,0 мм).

Значимое смещение структур головного мозга после вскрытия ТМО, потребовавшее принципиальной коррекции траектории таргетирования, наблюдали только у одного пациента с выраженной заместительной гидроцефалией (рис. 2, В–Г), незначительное смещение, не требовавшее коррекции, — у 8.

Boxplot процентного изменения размеров опухоли (увеличение vs уменьшение)

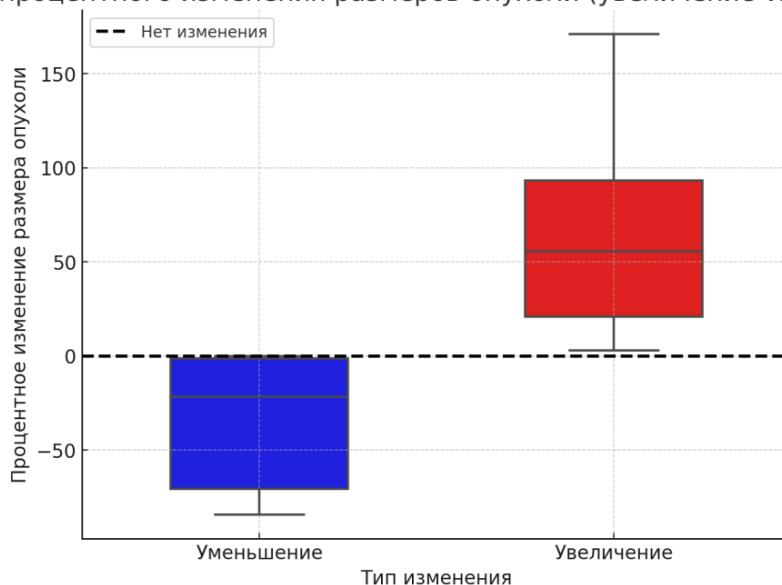


Рис. 6. Гистограмма изменения размеров целевой опухоли (в %) при сравнении данных предоперационного исследования (МРТ или ПЭТ-КТ) с данными, полученными во время интраоперационной ПДКТ с использованием различных видов контрастирования

Fig. 6. Histogram showing percentage change in target tumor dimensions between preoperative imaging (MRI or PET-CT) and intraoperative FDCT with different contrast protocols

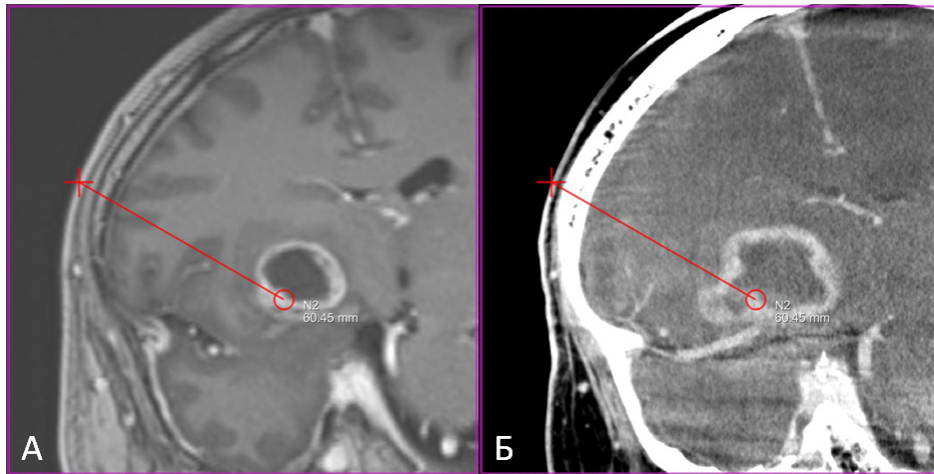


Рис. 7. Увеличение размеров зоны некроза опухоли при сравнении данных предоперационной МРТ (А) с данными интрапроцедурной ПДКТ в паренхиматозную фазу внутривенного болюсного контрастирования (Б). Очевидно, что при построении траектории таргетирования, по данным МРТ, забор ткани был бы произведен из некротизированной части опухоли, что, вероятнее всего, привело бы к неинформативности гистологического исследования. Разница между исследованиями составила три недели

Fig. 7. Expansion of the tumor necrosis zone between preoperative MRI (A) and intraprocedural FDCT during the parenchymal phase of intravenous bolus contrast (B). The three-week interval between imaging studies demonstrates significant tumor progression. Targeting based solely on the earlier MRI would have resulted in tissue sampling from the necrotic region, likely yielding non-diagnostic histopathological results

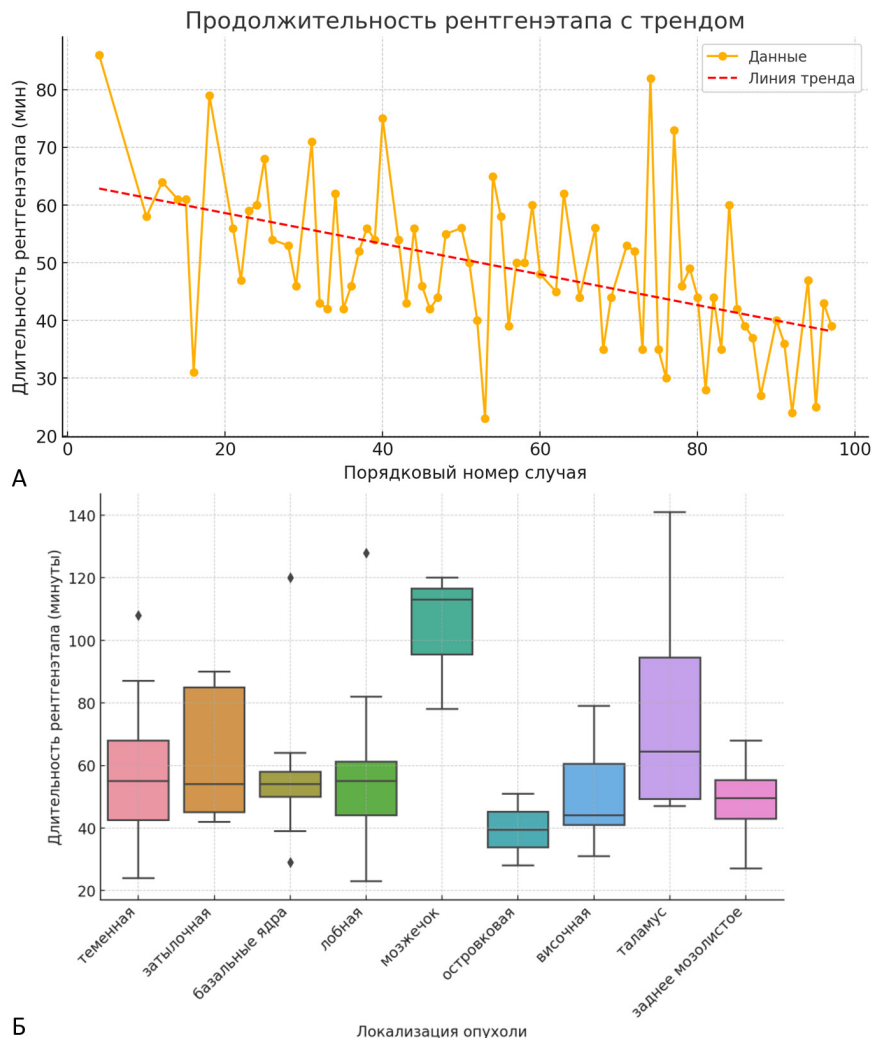


Рис. 8. А — на графике представлена зависимость продолжительности СТБ под ПДКТ-контролем от числа выполненных ранее процедур; Б — на диаграмме представлено распределение времени, потребовавшегося для проведения СТБ под ПДКТ-контролем, в зависимости от локализации целевых опухолей в головном мозге (пояснения в тексте)

Fig. 8. A. Correlation between procedure duration for FDCT-guided stereotactic brain biopsy (STB) and operator experience (number of previously performed procedures). Б. Distribution of procedure times for FDCT-guided STB according to target tumor location within the brain (see text for details)

Медиана продолжительности процедуры СТБ составила 53 (43; 65) мин. В ходе освоения методики и обучения персонала время значительно сократилось, что отражено на графике кривой обучения (рис. 8, А). Продолжительность вмешательства напрямую зависела от глубины залегания и локализации опухоли. При выполнении пост-хок анализа (Tukey HSD) тест Тьюки выявил значимые различия между продолжительностью СТБ новообразований мозжечка по сравнению со всеми другими локализациями опухолей (рис. 8, Б). Среднее число ПДКТ-сканирований за одну процедуру составило 4 (от 3 до 5, медиана — 4). Число сканирований зависело от вида контрастирования и этапа освоения методики, а также от анатомических особенностей пациента и локализации новообразований.

Морфологическая и молекулярно-генетическая верификация диагноза была получена у 97 из 99 пациентов (98,0 %). В 62 случаях выявлены глиальные опухоли, в 25 — лимфомы головного мозга, в 5 — демиелинизирующие процессы, в 3 — энцефалит, в одном — метастаз аденокарциномы, потребовавший поиска первичного опухолевого очага, и еще в одном случае — болезнь Эрджайма — Честера. В двух оставшихся наблюдениях биопсия не позволила установить морфологический диагноз, хотя в дальнейшем у одного пациента (после хирургического удаления опухоли) была верифицирована лимфома головного мозга, а у второго наблюдалась быстро прогрессирующая опухоль, по всей видимости, глиального ряда.

Клинически значимые осложнения зарегистрированы у трех пациентов (3,0 %). При этом в двух случаях имело место внутречерепное кровоизлияние, одно из которых было обусловлено отрывом переходной вены с массивным субдуральным кровотечением (рис. 5, А-Б), второе — интенсивным внутриопухолевым кровоизлиянием объемом 7,2 мл, что на фоне большого объема опухоли и перитуморозного отека привело к развитию дислокационного синдрома. В обоих случаях непосредственно в рентгеноперационной сразу после установки диагноза было выполнено экстренное нейрохирургическое вмешательство, обеспечившее надежный гемостаз. Третье осложнение в виде появления стойкой гипестезии было связано с локализацией опухоли в области проводящих путей спиноталамического тракта и скорее может рассматриваться как побочное действие СТБ. Внутриопухолевые клинически незначимые кровоизлияния были выявлены при контрольном ПДКТ-сканировании только в двух случаях и имели объем 0,6 и 1,5 мл. Судорог и инфекционных осложнений не наблюдали. Летальных исходов не было. При многофакторном анализе корреляции между объемом опухоли, глу-

биной ее залегания и локализацией вблизи функционально значимых зон мозга (речевые области, таламус, стволые структуры и др.) и развитием осложнений не выявлено. Средняя длительность госпитализации составила 4 койко-дня.

Обсуждение

Ранее было опубликовано только две работы, описывающие клинический опыт использования (роботизированных) ангиографических установок, оснащенных ПДКТ (Artis Zeego (Siemens, Германия) в первой [17] и Artis Pheno (Siemens, Германия) во второй [18] публикации) при проведении СТБ опухолей головного мозга. Однако как в первом, так и во втором случае ПДКТ-сканирование (без дополнительного контрастирования) использовали исключительно для «подхвата» костных ориентиров головы пациента с целью дальнейшего слияния изображений с данными все той же предоперационной МРТ. Поэтому в первом исследовании ПДКТ выполняли с прикрепленной к голове рамкой Leksell (по аналогии с МСКТ), а для построения траектории таргетирования и проведения СТБ использовали обычное программное обеспечение для стереотаксического планирования iPlan (Brainlab, Мюнхен, Германия) [17]. Во второй работе ПДКТ головы проводили с «захватом» расположенного на специальном держателе оптического локализатора, который использовали для привязки системы координат, автоматической регистрации МРТ-изображений и синхронизации работы с новой роботизированной системой наведения Circ (Brainlab, Мюнхен, Германия), впервые примененной вместо стандартного (для данного варианта безрамной СТБ) механического направителя VarioGuide (Brainlab, Мюнхен, Германия) [18].

Проведенное нами проспективное исследование показало высокую диагностическую эффективность процедуры СТБ с использованием современных технологий ПДКТ. Это можно объяснить возможностью постоянного контроля положения биопсийной иглы в режиме реального времени, что существенно повысило точность ее позиционирования по сравнению со «слепой» установкой при использовании рамной и оптической навигации. Кроме того, ПДКТ-визуализация дала возможность получать интраоперационные высокоточные данные о положении, объеме, размерах и структуре опухоли, которые, как было показано в нашей работе, могут достаточно быстро изменяться (смещение, уменьшение или увеличение опухоли, появление участков кровоизлияний и/или некроза и т.д.). Более того, при возникновении подозрений на нецелевое размещение иглы или смещение самой опухоли иглой (что чаще наблюдается при тар-

гетировании метастазов, как правило, имеющих фиброзную капсулу) всегда можно выполнить повторное сканирование и оценить реальное положение иглы непосредственно перед забором материала. Ранее в литературе были представлены две доклинические работы, выполненные на фантомах головы, которые показали высокую точность позиционирования иглы в целевой области при ее установке под ПДКТ-контролем с использованием лазерного наведения [21] или интегрированной в плоский детектор системы оптического слежения [22]. Клиническое исследование, в котором мы использовали как лазерное наведение, так и возможности дополненной рентгеноскопии, подтвердило эти предварительные доклинические данные.

В своей работе мы наблюдали только три осложнения (без летальных исходов), на основании чего можно сделать заключение о достаточно высокой безопасности метода СТБ под ПДКТ-контролем. При этом необходимо отметить, что серьезные осложнения и летальность, как было показано ранее, практически полностью обусловлены развитием внутрипроцедурных кровотечений [23], проявляющихся клинически в первый час после забора материала в половине случаев, а в течение первых 6 ч — в $\frac{3}{4}$ наблюдений (медиана — 60 мин) [24]. Предложенная нами технология ПДКТ-визуализации позволяет на самой ранней стадии (интраоперационно) диагностировать доклиническое внутриопухолевое кровоизлияние и другие виды кровотечений, а также провести их хирургическое лечение непосредственно в рентгенохирургической операционной, где выполнялась СТБ (например, установить наружный желудочковый дренаж или осуществить дренирование гематомы). Это, безусловно, дополнительно повышает безопасность процедуры СТБ.

Еще одним несомненным преимуществом предложенного метода СТБ является его высокая технологичность, оптимизирующая весь рабочий процесс, нивелируя временные и экономические затраты для привлечения структурных подразделений лучевой диагностики.

Учитывая тот факт, что в каждом онкологическом центре и онкологическом диспансере имеются рентгеноперационные, оснащенные современными ангиографическими установками с возможностью выполнения ПДКТ, данный метод может оказаться востребованным для верификации пациентов с первичными и метастатическими опухолями головного мозга.

Целенаправленного изучения дозы ионизирующего излучения, полученного персоналом и пациентами при проведении СТБ под ПДКТ-контролем, в нашей работе не проводилось. Однако некоторые соображения по этому поводу могут

быть озвучены исходя из данных о дозовых нагрузках во время ПДКТ-сканирований, опубликованных ранее. Как было показано в работе, выполненной на фантомах головы и шеи, дозовые нагрузки при выполнении ПДКТ как минимум вдвое меньше дозовых нагрузок во время одной фазы МСКТ-сканирования [25]. В нашем исследовании пациенту, в среднем, было выполнено четыре ПДКТ-сканирования, что сопоставимо с одной двухфазной МСКТ головы. Учитывая то, что предложенная методика практически исключает необходимость МСКТ как на этапе предоперационной подготовки пациента, так и для оценки внутриопухолевых кровоизлияний и других осложнений, можно говорить о том, что общая доза радиации, полученная пациентом во время биопсии под ПДКТ-контролем либо сопоставима, либо в два раза ниже дозы при проведении рамной СТБ. Кроме того, хорошо известно, что ПДКТ, благодаря дуговой траектории сканирования, позволяет более чем в пять раз снизить лучевую нагрузку на глаза (хрусталики глаз) пациента по сравнению с МСКТ, имеющей кольцевую траекторию [25]. В рутинной практике число ПДКТ-сканирований можно дополнительно уменьшить, если использовать для навигации данные МРТ и/или ПЭТ-КТ в режиме слияния изображений. В этих случаях ПДКТ может быть выполнена в значительно более низкодозовых «костных» режимах, достаточных для «подхвата» высокоинформативных модальностей [10, 25]. Однако обратной стороной снижения лучевой нагрузки здесь будет повышение риска развития серьезных осложнений с одновременным снижением диагностической эффективности. В любом случае после оптимизации алгоритма СТБ под ПДКТ-контролем целесообразно проведение исследований, оценивающих лучевую нагрузку как на пациента, так и на персонал. Также представляется целесообразным проведение рандомизированных исследований, сравнивающих диагностическую эффективность и безопасность предложенного нами метода СТБ под ПДКТ-контролем с результатами использования рамной и оптической СТБ. Перспективной также может быть интеграция различных технологий оптического и электромагнитного слежения вкупе с технологиями роботизированного наведения в уже существующие ангиографические комплексы, что может сократить лучевую нагрузку с сохранением высокой диагностической эффективности предложенного нами метода СТБ [9].

Заключение

Проведенное исследование продемонстрировало высокую диагностическую эффективность

и безопасность СТБ опухолей головного мозга под ПДКТ-контролем. Предложенный метод устранил основные ограничения рамной и безрамной СТБ, обеспечив надежное интраоперационное планирование траектории таргетирования, высококачественную нейровизуализацию и нейронавигацию в режиме реального времени, а также интраоперационную диагностику потенциальных осложнений с возможностью их своевременного устранения. Описанный метод СТБ представляется очень перспективным для дальнейшего практического использования, в особенности в учреждениях онкологического профиля, в структуре которых уже существуют отделения нейроонкологии и ОРХМДиЛ. Развитие данного направления интервенционной нейроонкологии возможно также на базе новых гибридных нейрохирургических операционных, оснащенных современными роботизированными ангиографическими комплексами.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Финансирование

Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding

This study was performed without funding.

Соблюдение прав пациентов и правил биоэтики

Исследование выполнено в соответствии с Хельсинкской декларацией ВМА в редакции 2013 г. Данный вид исследования не требует прохождения экспертизы локально-этическим комитетом.

Compliance with patient rights and principles of bioethics

The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki (2013). For this type of study, formal approval from an institutional ethics committee was not required.

Участие авторов

Курнос И.А. — дизайн и концепция исследования, сбор материала, поиск и анализ источников литературы, составление черновика рукописи;

Балахнин П.В. — дизайн и концепция исследования, сбор материала, поиск и анализ источников литературы, составление черновика рукописи;

Гуляев Д.А., Субботина Д.Р., Малькевич В.И. — дизайн и концепция исследования, научное редактирование статьи;

Муравцева А.Л., Шмелев А.С., Чиркин В.Ю., Буровик И.А. — поиск и анализ источников литературы, научное редактирование статьи;

Багненко С.С. — научное редактирование статьи;

Беляев А.М. — научное редактирование статьи.

Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией, выразили согласие нести ответственность за все аспекты работы, подразумевающую надлежащее изучение и решение вопросов, связанных с точностью или добросовестностью любой части работы.

Authors' contributions

Kurnosov I.A., Balakhnin P.V.: Study design and conceptualization, data collection, literature review and analysis, manuscript drafting.

Gulyaev D.A., Subbotina D.R., Malkevich V.I.: Study design and conceptualization, manuscript drafting.

Muravtseva A.L., Shmelev A.S., Chirkin V.Yu., Burovik I.A.: Literature review and analysis, critical revision and scientific editing of the manuscript.

Bagnenko S.S., Belyaev A.M.: scientific editing of the manuscript.

All authors approved the final version of the article prior to publication and agreed to take responsibility for all aspects of the work, including the proper review and resolution of any issues related to its accuracy or integrity.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Patel K.S., Carter B.S., Chen C.C. Role of biopsies in the management of intracranial gliomas. *Prog Neurol Surg*. 2018; 30: 232-243.-DOI: <https://doi.org/10.1159/000464439>.
2. Callovi G.M., Telera S., Sherkat S., et al. How is stereotactic brain biopsy evolving? A multicentric analysis of a series of 421 cases treated in Rome over the last sixteen years. *Clin Neurol Neurosurg*. 2018; 174: 101-107.-DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2018.09.020>.
3. Yu K.K.H., Patel A.R., Moss N.S. The role of stereotactic biopsy in brain metastases. *Neurosurg Clin N Am*. 2020; 31(4): 515-526.-DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuc.2020.06.002>.
4. Dhawan S., He Y., Bartek J., et al. Comparison of frame-based versus frameless intracranial stereotactic biopsy: Systematic review and meta-analysis. *World Neurosurg*. 2019; 127: 607-616.e4.-DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.04.016>.
5. Маряшев С.А., Поддубский А.А., Пронин И.Н., et al. Использование современных методов МРТ-визуализации для планирования стереотаксических биопсий опухолевых новообразований головного мозга. *Медицинская визуализация*. 2022; 26(2): 18-38.-EDN: JHODOR.-DOI: <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1046>. [Maryashev S.A., Poddubskiy A.A., Pronin I.N., et al. MRI imaging for planning stereotactic biopsies of the brain lesions. *Medicinskāā vizualizaciā = Medical Visualization*. 2022; 26(2): 18-38.-EDN: JHODOR.-DOI: <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1046> (in Rus)].
6. Ungar L., Nachum O., Zibly Z., et al. Comparison of frame-based versus frameless image-guided intracranial stereotactic brain biopsy: A retrospective analysis of safety and efficacy. *World Neurosurg*. 2022; 164: e1-e7.-DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2021.07.063>.
7. Sugii N., Matsuda M., Tsurubuchi T., Ishikawa E. Hemorrhagic complications after brain tumor biopsy: Risk-reduction strategies based on safer biopsy targets and techniques. *World Neurosurg*. 2023; 176: e254-e264.-DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2023.05.046>.
8. Bex A., Mathon B. Advances, technological innovations, and future prospects in stereotactic brain biopsies. *Neurosurg Rev*. 2022; 46(1): 5.-DOI: <https://doi.org/10.1007/s10143-022-01918-w>.
9. 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.-EDN: CHVTFU. [Balakhnin P.V., Burovik I.A., Bagnenko S.S. Technologies of visualization, guidance and tracking in interventional oncology: Current capabilities and prospects for further development. *Medicina Wysokich Tehnologij*. 2024; 2(2): 5-21.-EDN: CHVTFU (in Rus)].

10. Kalender W.A., Kyriakou Y. Flat-detector computed tomography (FD-CT). *Eur Radiol.* 2007; 17(11): 2767-79.-DOI: <https://doi.org/10.1007/s00330-007-0651-9>.
11. 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.-EDN: GKYDDI. [Balakhnin P.V., Bagnenko S.S., Belyaev A.M. Flat-detector computed tomography in interventional radiology: Background and history of creation. *Medicina Vysokih Tekhnologij.* 2024; 2(1): 12-34.-EDN: GKYDDI (in Rus)].
12. Raz E., Nossek E., Sahlein D.H., et al. Principles, techniques and applications of high resolution cone beam CT angiography in the neuroangio suite. *J Neurointerv Surg.* 2023; 15(6): 600-607.-DOI: <https://doi.org/10.1136/jnis-2022-018722>.
13. Key B.M., Tutton S.M., Scheidt M.J. Cone-beam CT with enhanced needle guidance and augmented fluoroscopy overlay: Applications in interventional radiology. *AJR Am J Roentgenol.* 2023; 221(1): 92-101.-DOI: <https://doi.org/10.2214/AJR.22.28712>.
14. Cooke D.L., Levitt M., Kim L.J., et al. Transcranial access using fluoroscopic flat panel detector CT navigation. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2011; 32(4): E69-70.-DOI: <https://doi.org/10.3174/ajnr.A2066>.
15. Fiorella D., Peeling L., Denice C.M., et al. Integrated flat detector CT and live fluoroscopic-guided external ventricular drain placement within the neuroangiography suite. *J Neurointerv Surg.* 2014; 6(6): 457-60.-DOI: <https://doi.org/10.1136/neurintsurg-2013-010856>.
16. Yang Z., Hong B., Jia Z., et al. Treatment of supratentorial spontaneous intracerebral hemorrhage using image-guided minimally invasive surgery: Initial experiences of a flat detector CT-based puncture planning and navigation system in the angiographic suite. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2014; 35(11): 2170-5.-DOI: <https://doi.org/10.3174/ajnr.A4009>.
17. Enders F., Rothfuss A., Brehmer S., et al. Optimized intraoperative imaging for stereotactic planning with a multiaxial robotic C-arm system: Technical note and case series. *J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg.* 2022; 83(6): 588-595.-DOI: <https://doi.org/10.1055/s-0041-1731754>.
18. Truckenmueller P., Früh A., Kissner J.F., et al. Integration of a lightweight and table-mounted robotic alignment tool with automated patient-to-image registration using robotic cone-beam CT for intracranial biopsies and stereotactic electroencephalography. *Neurosurg Focus.* 2024; 57(6): E2.-DOI: <https://doi.org/10.3171/2024.9.FOCUS24525>.
19. Курносоев И.А., Балахнин П.В., Субботина Д.Р., et al. Интраоперационная плоскодетекторная компьютерная томография как метод выбора при стереотаксической биопсии опухолей головного мозга. *Вопросы онкологии.* 2023; 69(3S): 287-288.-EDN: SVIIDD. [Kurnosov I.A., Balakhnin P.V., Subbotina D.R., et al. Intraoperative flat-panel computed tomography as the method of choice for stereotactic biopsy of brain tumors. *Voprosy Onkologii = Problems in Oncology.* 2023; 69(3S): 287-288.-EDN: SVIIDD (in Rus)].
20. Poca M.A., Martínez-Ricarte F.R., Gándara D.F., et al. Target location after deep cerebral biopsies using low-volume air injection in 75 patients. Results and technical note. *Acta Neurochir (Wien).* 2017; 159(10): 1939-1946.-DOI: <https://doi.org/10.1007/s00701-017-3191-3>.
21. Mabray M.C., Datta S., Lillaney P.V., et al. Accuracy of flat panel detector CT with integrated navigational software with and without MR fusion for single-pass needle placement. *J Neurointerv Surg.* 2016; 8(7): 731-5.-DOI: <https://doi.org/10.1136/neurintsurg-2015-011799>.
22. Skyrman S., Lai M., Edström E., et al. Augmented reality navigation for cranial biopsy and external ventricular drain insertion. *Neurosurg Focus.* 2021; 51(2): E7.-DOI: <https://doi.org/10.3171/2021.5.FOCUS20813>.
23. Riche M., Amelot A., Peyre M., et al. Complications after frame-based stereotactic brain biopsy: a systematic review. *Neurosurg Rev.* 2021; 44(1): 301-307.-DOI: <https://doi.org/10.1007/s10143-019-01234-w>.
24. Riche M., Marijon P., Amelot A., et al. Severity, timeline, and management of complications after stereotactic brain biopsy. *J Neurosurg.* 2021; 136(3): 867-876.-DOI: <https://doi.org/10.3171/2021.3.JNS21134>.
25. Daly M.J., Siewerdsen J.H., Moseley D.J., et al. Intraoperative cone-beam CT for guidance of head and neck surgery: Assessment of dose and image quality using a C-arm prototype. *Med Phys.* 2006; 33(10): 3767-80.-DOI: <https://doi.org/10.1118/1.2349687>.

Поступила в редакцию / Received / 14.04.2025

Прошла рецензирование / Reviewed / 27.07.2025

Принята к печати / Accepted for publication / 25.09.2025

Сведения об авторах / About the authors / ORCID

Иван Александрович Курносоев / Ivan A. Kurnosov / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2857-8368>; eLibrary SPIN: 9131-7381; Author ID: 1065892.

Павел Васильевич Балахнин / Pavel V. Balakhnin / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3042-6729>; eLibrary SPIN: 1431-4012; Author ID: 727661.

Дмитрий Александрович Гуляев / Dmitry A. Gulyaev / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5509-5612>; eLibrary SPIN: 1612-8261; Author ID: 305822.

Дарья Романовна Субботина / Daria R. Subbotina / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0836-4960>; eLibrary SPIN: 8244-1435; Author ID: 1136236.

Василий Игоревич Малькевич / Vasilii I. Malkevich / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1082-6071>; eLibrary SPIN: 8143-9671; Author ID: 988405.

Анастасия Леонидовна Муравцева / Anastasia L. Muravtseva / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4221-4248>; eLibrary SPIN: 9412-0279; Author ID: 1118320.

Алексей Станиславович Шмелев / Aleksei S. Shmelev / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1610-8820>; eLibrary SPIN: 2772-2824; Author ID: 860525.

Владислав Юрьевич Чиркин / Vladislav Yu. Chirkin / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0610-1131>; eLibrary SPIN: 2940-3562; Author ID: 474360.

Илья Александрович Буровик / Ilya A. Burovik / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4714-1228>; eLibrary SPIN: 1923-6457; Author ID: 972194.

Сергей Сергеевич Багненко / Sergey S. Bagnenko / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4131-6293>; eLibrary SPIN: 4389-9374; Author ID: 779096.

Алексей Михайлович Беляев / Aleksey M. Belyaev / ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5580-4821>; eLibrary SPIN: 9445-9473; Author ID (Scopus): 273109.

