

МЕДИЦИНСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

MEDICAL VISUALIZATION

Том
Vol 30 №3

2026



В ЭТОМ ВЫПУСКЕ

- Глиома под прицелом:
двойная визуализация
ради спасения мозга
- Ультразвуковой
предиктор инсульта:
фиброзная покрывка
бляшки
- От рентгена
к метаболизму:
почему ПЭТ/КТ
становится новым
стандартом при миеломе

МЕДИЦИНСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

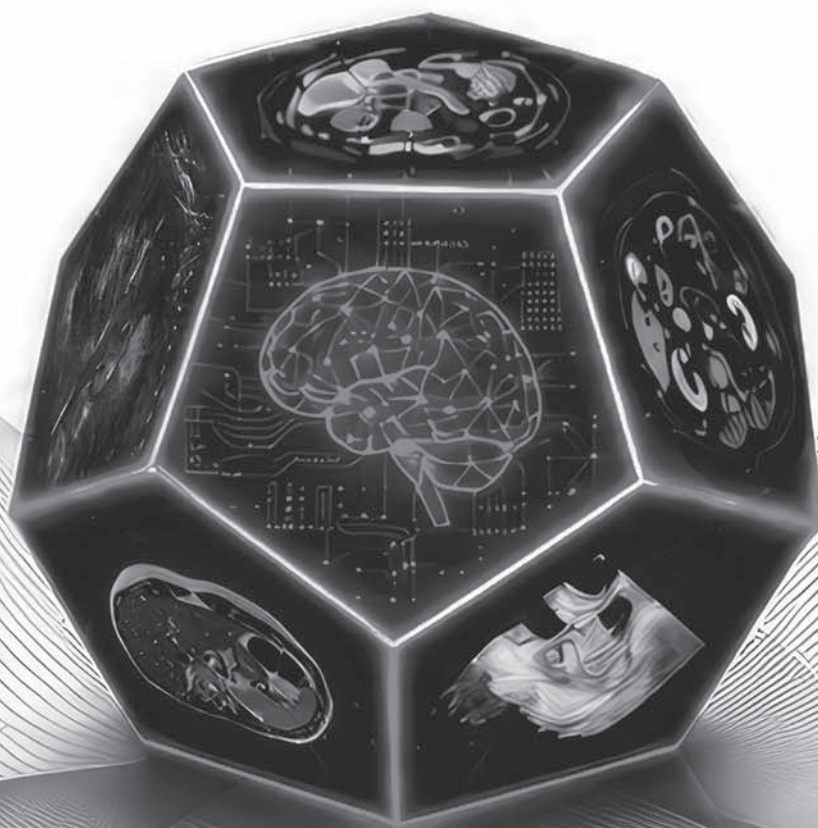
MEDICAL VISUALIZATION

Том
Vol 30 №3

2026

В ЭТОМ ВЫПУСКЕ

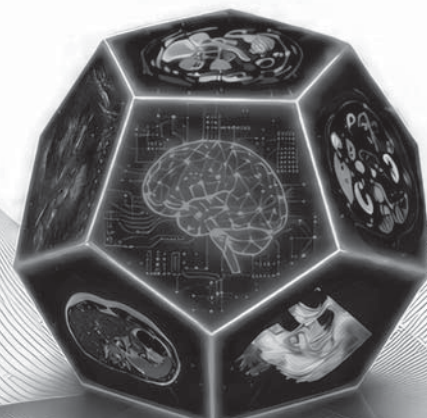
- Глиома под прицелом:
двойная визуализация
ради спасения мозга
- Ультразвуковой
предиктор инсульта:
фиброзная покрышка
бляшки
- От рентгена
к метаболизму:
почему ПЭТ/КТ
становится новым
стандартом при миеломе



МЕДИЦИНСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

MEDICAL VISUALIZATION

MEDVIS.RDSMEDIA.RU



Том 30 №3

2026

Научно-практический журнал. Основан в 1997 г.

Выходит 4 раза в год

**Официальный
печатный
орган**

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр хирургии им. А.В. Вишневского» Минздрава России (117997, Москва, ул. Большая Серпуховская, д. 27)
Российского общества рентгенологов и радиологов
(129344, Москва, ул. Верхоянская, д. 18, корп. 2)
Московского регионального отделения Российского общества рентгенологов и радиологов (125040, Москва, ул. Расковой, д. 16/26, стр. 1)

Издатель

ООО «РДС-Медиа» (www.rdsmedia.ru)

Главные редакторы

Ревишвили Амиран Шотаевич – академик РАН, доктор мед. наук, профессор, Генеральный директор ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр хирургии им. А.В. Вишневского» Минздрава России, Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0003-1791-9163>. Scopus Author ID: 7003940753

Нуднов Николай Васильевич – доктор мед. наук, профессор, заслуженный врач Российской Федерации, заместитель директора по научной работе ФГБУ «Российский научный центр рентгенорадиологии» Минздрава России, Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0001-5994-0468>. Scopus Author ID: 7004927053

Заместитель главного редактора

Громов Александр Игоревич – доктор мед. наук, профессор, руководитель группы лучевых методов диагностики и лечения НИИ урологии и интервенционной радиологии им. Н.А. Лопаткина – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0002-9014-9022>. Scopus Author ID: 7102053957

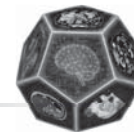
Научные консультанты

Каприн Андрей Дмитриевич – академик РАН и РАО, доктор мед. наук, профессор, генеральный директор ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава России, Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0001-8784-8415>

Пронин Игорь Николаевич – академик РАН, доктор мед. наук, профессор, заместитель директора по научной работе ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Российская Федерация. Scopus Author ID: 7006011755

Зав. редакцией

Сафонова Татьяна Дмитриевна – канд. мед. наук. E-mail: safonova.td@mail.ru



Редакционная коллегия

Анфиногенова Нина Джоновна – доктор мед. наук, ведущий научный сотрудник отделения популяционной кардиологии НИИ кардиологии Томского НИМЦ, Томск, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0003-1106-0730>. Scopus Author ID 15755135700

Араблинский Андрей Владимирович – доктор мед. наук, профессор, профессор кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского ФГАУ ВО “Первый МГМУ имени И.М. Сеченова” Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0003-0854-3598>. Scopus Author ID 55446175400

Ахадов Толибджон Абдуллаевич – доктор мед. наук, профессор, руководитель отдела лучевой диагностики ГБУЗ города Москвы “Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии Департамента здравоохранения города Москвы”, Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000000308543598>. Scopus Author ID 6701867282

Ахметов Ермек Абибуллаевич – доктор мед. наук, доцент, доцент кафедры онкологии и визуальной диагностики Казахстанско-Российского медицинского университета, Алматы, Республика Казахстан.

Борсуков Алексей Васильевич – доктор мед. наук, профессор, директор Проблемной научно-исследовательской лаборатории “Диагностические исследования и малоинвазивные технологии” ФГБОУ ВО “Смоленский государственный медицинский университет” Минздрава России, Смоленск, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000000340477252>. Scopus Author ID 7801311680

Васильев Юрий Александрович – доктор. мед. наук, директор ГБУЗ “Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы”, Москва, Российская Федерация.

Вишнякова Марина Валентиновна – доктор мед. наук, заведующая отделением лучевой диагностики ГБУЗ МО “Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского”, Москва, Российская Федерация. <http://orcid.org/0000-0003-3838-636X>. Scopus Author ID: 6603209206

Ветшева Наталья Николаевна – доктор мед. наук, профессор кафедры ультразвуковой диагностики ФГБОУ ДПО “Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования” Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Российская Федерация. <http://orcid.org/0000-0002-9017-9432>. Scopus Author ID: 6176616600

Груздев Иван Сергеевич – канд. мед. наук, научный сотрудник отделения рентгеновских и магнитно-резонансных методов исследования ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр хирургии им. А.В. Вишневского” Минздрава России, Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0003-0781-9898>. Scopus Author ID: 57209689128.

Гус Александр Иосифович – доктор мед. наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр акушерства, гинекологии и перинатологии имени академика В.И. Кулакова” Минздрава России, Москва, Российская Федерация. Scopus Author ID 6508263197

Даутов Таирхан Бекполатович – доктор мед. наук, директор Клинико-академического департамента радиологии и ядерной медицины Университетского медицинского центра, Нур-Султан, Республика Казахстан. <http://orcid.org/0000-0002-5267-0108>. Scopus Author ID 55836811900

Джураева Нигора Мухсумовна – доктор мед. наук, старший научный сотрудник отделения МР- и КТ-диагностики ГУ “Республиканский специализированный научно-практический медицинский центр хирургии имени академика В. Вахидова”, Ташкент, Республика Узбекистан. <https://orcid.org/0000-0002-2232-8264>

Долгушин Борис Иванович – академик РАН, доктор мед. наук, профессор, директор НИИ клинической и экспериментальной радиологии ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина” Минздрава России; профессор кафедры рентгенологии и радиологии ФГБОУ НПО РМАНПО Минздрава России, Москва, Российская Федерация. Президент Национального общества интервенционных онкорadiологов. <https://orcid.org/0000-0001-7185-7165>. Scopus Author ID: 6604000392

Захарова Наталья Евгеньевна – доктор мед. наук, профессор РАН, профессор Национального медицинского исследовательского центра нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко, профессор кафедры нейрохирургии с курсами нейронаук НМИЦ нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко, Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0002-0516-3613>. Scopus Author ID: 36616114800

Икрамов Адхам Ильхамович – доктор мед. наук, профессор, заведующий кафедрой медицинской радиологии Центра развития профессиональной квалификации медицинских работников при Минздраве Республики Узбекистан, Ташкент, Республика Узбекистан. Scopus Author ID: 6603001286

Казакова Лариса Васильевна – доктор мед. наук, заведующая отделением ультразвуковой диагностики отдела лучевой диагностики ФБУЗ “Приволжский окружной медицинский центр” ФМБА России, Нижний Новгород, Российская Федерация

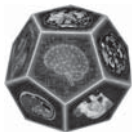
Кондратьев Евгений Валерьевич – канд. мед. наук, заведующий отделом рентгеновских и магнитно-резонансных методов исследования ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр хирургии им. А.В. Вишневского” Минздрава России, Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0001-7070-3391>. Scopus Author ID: 55865664400

Корженкова Галина Петровна – доктор мед. наук, профессор кафедры рентгенологии и радиологии РМАНПО; старший научный сотрудник ФГБУ “НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина” Минздрава России, Москва, Российская Федерация

Котляров Петр Михайлович – доктор мед. наук, профессор, руководитель научно-исследовательского отдела новых технологий и семиотики лучевой диагностики заболеваний органов и систем ФГБУ “Российский научный центр рентгенорадиологии” Минздрава России, Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000000319409175>. Scopus Author ID: 7003497625

Лукьянченко Александр Борисович – доктор мед. наук, профессор, ведущий научный сотрудник ФГБУ “НМИЦ онкологии имени Н.Н. Блохина” Минздрава России, Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0002-7021-6419>. Scopus Author ID 6507563458

Мазо Михаил Львович – канд. мед. наук, старший научный сотрудник НЦОРО Московский научно-исследовательский онкологический институт им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр радиологии” Минздрава России, Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0002-1313-6420>. Scopus Author ID 25623348800



Мищенко Андрей Владимирович – доктор мед. наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО “Санкт-Петербургский государственный университет”, Научно-клинический и образовательный центр “Лучевая диагностика и ядерная медицина”; ведущий научный сотрудник ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Петрова” Минздрава России, Санкт-Петербург, Российская Федерация. Scopus Author ID: 55791087500

Петрайкин Алексей Владимирович – доктор. мед. наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела инновационных технологий ГБУЗ “Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы”, Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000000316944682>. Scopus Author ID: 7801330975

Прокопенко Сергей Павлович – канд. мед. наук, доцент, заведующий отделением МНИОИ им. П.А.Герцена – филиал ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава России, Москва, Российская Федерация. <http://orcid.org/0000-0002-0369-5755>. Scopus Author ID: 7004120546

Рахимжанова Раушан Ибжановна – доктор мед. наук, профессор, почетная заведующая кафедрой радиологии имени академика Ж.Х. Хамзабаева НАО “Медицинский университет Астана”, Нур-Султан, Республика Казахстан. <https://orcid.org/0000-0002-3490-6324>. Scopus Author ID: 55776205100

Ростовцев Михаил Владиславович – заведующий отделением лучевой диагностики Центрального клинического госпиталя Федеральной таможенной службы РФ, профессор кафедры рентгенологии и радиологии ФГБОУ ДПО “Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования” Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0002-5032-4164>

Рубцова Наталья Алефтиновна – доктор мед. наук, доцент, заведующая отделом лучевой диагностики ФГБУ “Московский научно-исследовательский онкологический институт им. П.А. Герцена” – филиал ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр радиологии” Минздрава России, Москва, Российская Федерация. Scopus Author ID: 15844343600

Сафонов Дмитрий Владимирович – доктор мед. наук, профессор, заведующий кафедрой лучевой диагностики ФДПО “Приволжский исследовательский медицинский университет” Минздрава России, Нижний Новгород, Российская Федерация. Scopus Author ID 55647448500

Синицын Валентин Евгеньевич – доктор мед. наук, профессор, руководитель отдела лучевой диагностики факультета фундаментальной медицины МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>. Scopus Author ID: 7102735724

Степанова Юлия Александровна – доктор мед. наук, старший научный сотрудник отделения ультразвуковой диагностики ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр хирургии им. А.В. Вишневского” Минздрава России, Москва, Российская Федерация. <http://orcid.org/0000-0002-2348-4963>. Scopus Author ID 57194482656

Тарачкова Елена Владимировна – канд. мед. наук, ассистент кафедры рентгенологии и радиологии ФГБОУ ДПО “Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования” Минздрава России, Москва, Российская Федерация. Scopus Author ID 56321456200

Трофимова Татьяна Николаевна – доктор мед. наук, профессор, профессор кафедры рентгенологии и радиационной медицины ФГБОУ ВО “СанктПетербургский государственный университет”, СанктПетербург, Российская Федерация. <http://orcid.org/0000-0003-4871-2341>. Scopus Author ID: 7006098439

Троян Владимир Николаевич – доктор мед. наук, профессор, начальник Центра лучевой диагностики, главный рентгенолог ФГБУ “Главный военный клинический госпиталь им. акад. Н.Н. Бурденко” Министерства обороны Российской Федерации, Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0002-8008-9660>

Туманова Ульяна Николаевна – доктор мед. наук, ведущий научный сотрудник, врач-рентгенолог ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр акушерства, гинекологии и перинатологии имени академика В.И. Кулакова» Минздрава России, Москва, Российская Федерация. <http://orcid.org/0000-0002-0924-6555>. Scopus Author ID: 55352350200

Усов Владимир Юрьевич – доктор мед. наук, профессор, старший научный сотрудник НИИ кардиологии ФГБНУ “Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук”; доцент ФГАОУ “Национальный исследовательский Томский политехнический университет”, НОЦ им. Н.М. Кижнера, Томск, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0002-7352-6068>. Scopus Author ID: 16937595600

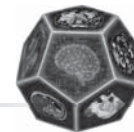
Федорук Алексей Михайлович – доктор мед. наук, профессор, заведующий отделом гепатологии и малоинвазивной хирургии ГУ “Минский научно-практический центр хирургии, трансплантологии и гематологии”, Минск, Республика Беларусь. Scopus Author ID 56531839500

Фисенко Елена Полиектовна – доктор мед. наук, главный научный сотрудник ФГБНУ “Российский научный центр хирургии имени академика Б.В. Петровского”, Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0003-4503-950X>. Scopus Author ID 6507536162

Хомутова Елена Юрьевна – доктор мед. наук, заведующая кафедрой лучевой диагностики ФГБОУ ВО “Омский государственный медицинский университет” Минздрава России, Омск, Российская Федерация. Scopus Author ID 57189104536

Хохлов Александр Леонидович – академик РАН, доктор мед. наук, профессор, заведующий кафедрой клинической фармакологии и этики применения лекарств ЮНЕСКО ФГБОУ ВО “Ярославский государственный медицинский университет” Минздрава России, Ярославль, Российская Федерация. <http://orcid.org/0000-0002-0032-0341>. Scopus Author ID: 7201745706

Хромов-Борисов Никита Николаевич – канд. биол. наук, старший научный сотрудник ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова” Минздрава России, Санкт-Петербург, Российская Федерация. <http://orcid.org/0000-0001-6435-7218>. Scopus Author ID 7003518614



Шейх Жанна Владимировна – доктор мед. наук, профессор, заведующая кафедрой лучевой диагностики и медицинской визуализации факультета непрерывного медицинского образования медицинского института Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы; профессор кафедры рентгенологии и радиологии ФГБОУ ДПО “Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования” Минздрава России; профессор кафедры лучевой диагностики Медико-биологического университета инноваций и непрерывного образования, ФГБУ “Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна” ФМБА России, Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0003-1334-6652>. Scopus Author ID 57285215600

Юдин Андрей Леонидович – доктор мед. наук, профессор, заведующий кафедрой лучевой диагностики и терапии медико-биологического факультета ФГБОУ ВО “Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова” Минздрава России, Москва, Российская Федерация. <http://orcid.org/0000-0002-0310-0889>. Scopus Author ID 7102669707

Nicholas C. Gourtsoyiannis – иностранный член РАН, доктор мед. наук, профессор, директор Европейской школы радиологии, Афины, Греция. Scopus Author ID: 24369117700

Rienm Iler Rainer – иностранный член РАН, доктор мед. наук, профессор, профессор отделения общей радиологии Медицинского университета Грац, Австрия. <https://orcid.org/0000-0002-6068-5027>. Scopus Author ID 7003654650

Yang Qin – доктор мед. наук, руководитель группы функционально-реконструктивной хирургии пищевода и желудка ГКБ №1 при Медицинском университете Фуцзянь, г.Фуцжоу, Китайская Народная Республика.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС-77-21017 от 12.05.05 г.

Журнал включен ВАК РФ в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук

Журнал включен в библиографическую и реферативную базу данных **Scopus**

Адрес для корреспонденции

117997 Москва, ул. Большая Серпуховская, д. 27. НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского
(Ревишвили Амиран Шотаевич)

E-mail: nudnov@nccr.ru Тел.: +7-495-334-29-60 (Нуднов Николай Васильевич)

<https://medvis.rdsmedia.ru/jour/index>

ООО “РДС-Медиа” <https://www.rdsmedia.ru>

Редакция не несет ответственности за содержание публикуемых рекламных материалов

Материалы этого издания не могут воспроизводиться ни в какой форме без письменного разрешения.

Формат 60 × 90 1/8. Печ. л. 18. Тираж 1500 экз. Свободная цена.
Отпечатано в типографии ООО “Фолиант”
Подписано в печать 30.09.2026 г.

Редактирование Т.И. Луковская

Художники О.А. Рыченкова, Ю.А. Кушель

Верстка Ю.А. Кушель

«МЕДИЦИНСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ»

© ООО “РДС-Медиа”, 2026.

Все права сохраняются.

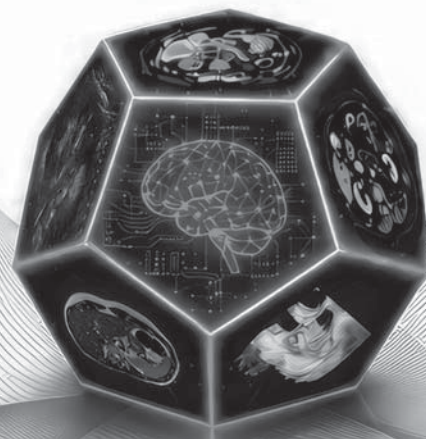
ISSN 1607-0763 (PRINT)
ISSN 2408-9516 (ONLINE)

DOI: 10.24835

M E D I C A L VISUALIZATION

МЕДИЦИНСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

MEDVIS.RDSMEDIA.RU



Vol 30 N3

2026

Quarterly Scientific and Practical Journal

Est. 1997

**Official
press organ
of the**

A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery
(27, Bol'shaya Serpukhovskaya str., 117997, Moscow, Russian Federation)

Russian Society of Roentgenologists and Radiologists
(18-2, Verkhoyanskaya str., 129344, Moscow, Russian Federation)

Moscow regional department of of the Russian Society of Roentgenologists and Radiologists
(16/26, bld.1, Raskovoi str., 125040, Moscow, Russian Federation)

Is published by

RDS-Media Ltd. (postbox 5, 1, bld. 12, 8 Marta str., Moscow 127083, Russian Federation)

Editors-in-Chief

Amiran Sh. Revishvili – Academician of the Russian Academy of Science, Doct. of Sci. (Med.), Professor, Director General of A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery, Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0003-1791-9163>. Scopus Author ID: 7003940753

Nikolay V. Nudnov – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Honored Doctor of the Russian Federation, Deputy Director for Science and Research at the Russian Research Center of Radiology, Moscow, Russian Federation. Email: nudnov@rncrr.ru.
<https://orcid.org/0000-0001-5994-0468>. Scopus Author ID: 7004927053

Publishing Editor

Alexander I. Gromov – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head of the group of radiation methods of diagnosis and treatment N. Lopatkin Scientific Research Institute of Urology and Interventional Radiology – branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation. Email: gai8@mail.ru.
<https://orcid.org/0000-0002-9014-9022>. Scopus Author ID: 7102053957

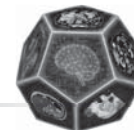
Scientific consultants

Andrey D. Kaprin – Academician of the Russian Academy of Sciences, Academician of Russian Academy of Education, Doct. of Sci. (Med.), Professor, Honored Doctor of the Russian Federation, General Director of "National Medical Radiological Research Center" of the Ministry of Health of the Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0001-8784-8415>

Igor N. Pronin – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doct. of Sci. (Med.), Professor, Deputy Director for the scientific work of the N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Moscow, Russian Federation. Scopus Author ID: 7006011755

Chief of office

Tatyana D. Safonova – Cand. of Sci. (Med.). E-mail: safonova.td@mail.ru



Editorial board

Nina J. Anfinogenova – Doct. of Sci. (Med.), leading researcher at the Department of Population Cardiology, Research Institute of Cardiology, Tomsk National Research Medical Center, Tomsk, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-1106-0730>. Scopus Author ID 15755135700

Andrey V. Arablinskiy – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Professor at the Department of Radiologic Diagnosis and Therapy of N.V. Sklifosovskiy Institute of Clinical Medicine, Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-0854-3598>. Scopus Author ID 55446175400

Tolibdzhon A. Akhadov – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Diagnostic Radiology, Clinical and Research Institute of Emergency Pediatric Surgery and Trauma Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-3235-8854>

Yermek A. Akhmetov – Doct. of Sci. (Med.), Associate Professor at the Department of Oncology and Imaging Kazakh-Russian Medical University, Almaty, Republic of Kazakhstan.

Alexey V. Borsukov – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Director of Problem Research Laboratory "Diagnostic Researches and Mini-invasive Technologies", Smolensk State Medical University, Smolensk, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-4047-7252>. Scopus Author ID 7801311680

Yuri A. Vasiliev – Doct. of Sci. (Med.), Director of Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow, Russian Federation.

Marina V. Vishnyakova – Doct. of Sci. (Med.), head of radiology department of Moscow Regional Clinical and Research Institute named after M.F. Vladimirsky (MONIKI), Moscow, Russian Federation. <http://orcid.org/0000-0003-3838-636X> Scopus Author ID: 6603209206

Natalia N. Vetsheva – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Diagnostic Ultrasound Division, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russian Federation. <http://orcid.org/0000-0002-9017-9432>. Scopus Author ID: 6176616600

Ivan S. Gruzdev – Cand. of Sci. (Med.), Researcher of the X-ray and Magnetic Resonance Department, A.V. Vishnevsky National Medical Research Centre of Surgery, Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-0781-9898>. Scopus Author ID: 57209689128

Alexander I. Gus – Doct. of Sci. (Med.), Professor, principal researcher of Research Center for Obstetrics, Gynecology and Perinatology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation. Scopus Author ID 6508263197

Tairkhan B. Dautov – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Director of the Clinical and Academic Department of Radiology and Nuclear Medicine, University Medical Center. Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan. <http://orcid.org/0000-0002-5267-0108>. Scopus Author ID 55836811900

Nigora M. Djuraeva – Doct. of Sci. (Med.), Senior Researcher at the Department of MRI and CT Diagnosis of Republican Specialized Scientific and Practical Medical Center for Surgery named after Academician V. Vakhidov Tashkent, Uzbekistan. <https://orcid.org/0000-0002-2232-8264>

Boris I. Dolgushin – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doct. of Sci. (Med.), Professor; Director of the Research Institute of Clinical and Experimental Radiology, National Medical Research Center of Oncology named after N.N. Blokhin; Professor at the Department of Radiology, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russian Federation; President of the National Society of Interventional Oncoradiologists. <https://orcid.org/0000-0001-7185-7165>. Scopus Author ID: 6604000392

Natalia E. Zakharova – Doct. of Sci. (Med.), professor of Russian Academy of Sciences, professor of N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-0516-3613>. Scopus Author ID: 36616114800

Adkham I. Ikramov – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Medical Radiology, Center for the Development of Professional Qualifications of Medical Workers of the Ministry of Health of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan. Scopus Author ID: 6603001286

Larisa V. Kazakova – Doct. of Sci. (Med.), Head of Ultrasonic Diagnostics at the Department of Radiological Diagnostics in Privolzhsky District Medical Center, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Evgeny V. Kondratyev – Cand. of Sci. (Med.), Head of the X-ray and Magnetic Resonance Department, A.V. Vishnevsky National Medical Research Centre of Surgery, Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0001-7070-3391>. Scopus Author ID: 55865664400

Galina P. Korzhenkova – Doct. of Sci. (Med.), Professor of the Department of Radiology; radiologist of N.N. Blokhin Medical Research Center of Oncology of the Ministry of Health of Russian Federation (N.N. Blokhin NMRCO), Moscow, Russian Federation

Peter M. Kotlyarov – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head of the Research Department for New Technologies and Semiotics of Diagnostic Radiology in Diseases and Body Systems, Russian Research Center for X-Ray and Radiology, Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-1940-9175>. Scopus Author ID: 7003497625

Alexander B. Lukianchenko – Doct. of Sci. (Med.), Professor, leading researcher of N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-7021-6419>. Scopus Author ID 6507563458

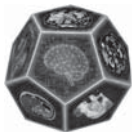
Mikhail L. Mazo – Cand. of Sci. (Med.), senior researcher of P. Hertsen Moscow Oncology Research Institute – branch of the National Medical Research Center of Radiology, Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-1313-6420>. Scopus Author ID 25623348800

Andrey V. Mishchenko – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Professor of St. Petersburg State University, Research, Clinical and Educational Center "Diagnostic Radiology and Nuclear Medicine"; leading researcher of N.N. Petrov National Medicine Research Center of Oncology, St. Petersburg, Russian Federation. Scopus Author ID: 55791087500

Alexey V. Petraikin – Doct. of Sci. (Med.), Associate Professor, leading researcher at the Department of Innovative Technologies, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-1694-4682>. Scopus Author ID: 7801330975

Sergey P. Prokopenko – Cand. of Sci. (Med.), Associate Professor, Head of the Department, P. Hertsen Moscow Oncology Research Institute – branch of the National Medical Research Center of Radiology (Moscow, Russian Federation). <http://orcid.org/0000-0002-0369-5755>. Scopus Author ID: 7004120546

Raushan I. Rakhimzhanova – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Honorary Head of the Zh.Kh. Khamzabaev Department of Radiology, Astana Medical University, Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan. <https://orcid.org/0000-0002-3490-6324>. Scopus Author ID: 55776205100



Mikhail V. Rostovtsev – Doct. of Sci. (Med.), Head of the Department of Radiology, Central Clinical Hospital of the Federal Customs Service of the Russian Federation, Professor, Department of Roentgenology and Radiology, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-5032-4164>

Natalia A. Rubtsova – Doct. of Sci. (Med.), Associate Professor, Head of the Department of Diagnostic Radiology, P.A. Herzen Moscow Research Oncology Institute – branch of “National Medical Research Center of Radiology” of the Ministry of Healthcare of Russia, Moscow, Russian Federation. Scopus Author ID: 15844343600

Dmitry V. Safonov – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Chairman of the Department of Diagnostic Radiology, Privolzhsky Research Medical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation. Scopus Author ID 55647448500

Valentin E. Sinitsyn – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Diagnostic Radiology of the Medical Research and Education Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>. Scopus Author ID: 7102735724

Yulia A. Stepanova – Doct. of Sci. (Med.), Senior Researcher, Ultrasound Diagnostics Department of A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery, Moscow, Russian Federation. <http://orcid.org/0000-0002-2348-4963>. Scopus Author ID 57194482656

Elena V. Tarachkova – Cand. of Sci. (Med.) Assistant Professor Chair of Radiology, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation. Scopus Author ID 56321456200

Tat'yana N. Trofimova – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Professor at the Department of Radiology and Radiation Medicine, Pavlov First State Medical University of St. Petersburg, St. Petersburg, Russian Federation. <http://orcid.org/0000-0003-4871-2341>. Scopus Author ID: 7006098439

Vladimir N. Troyan – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head of the Center for Diagnostic Radiology, Chief Radiologist Main military clinical hospital named after academician N.N. Burdenko, Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-8008-9660>

Uliana N. Tumanova – Doct. of Sci. (Med.), radiologist, leading researcher of the 2nd pathology department of National Medical Research Center for Obstetrics, Gynecology and Perinatology named after Academician V.I. Kulakov, Moscow, Russian Federation. <http://orcid.org/0000-0002-0924-6555>. Scopus Author ID: 55352350200

Vladimir Yu. Usov – Doct. of Sci. (Med.), Professor, senior researcher, Tomsk National Research Medical Center of the Russian Academy of Sciences, Research Institute of Cardiology; Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, Kizhner Research Center, Tomsk, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-7352-6068>. Scopus Author ID: 16937595600

Aleksey M. Fedoruk – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Hepatology and Minimally Invasive Surgery, Minsk Scientific and Practical Center for Surgery, Transplantology and Hematology, Minsk, Republic of Belarus. Scopus Author ID 56531839500

Elena P. Fisenko – Doct. of Sci. (Med.), Petrovsky National Research Centre of Surgery (Moscow, Russian Federation), principal researcher, Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-4503-950X>. Scopus Author ID 6507536162

Elena Yu. Khomutova – Doct. of Sci. (Med.), Chairman of the Department of Diagnostic Radiology, Omsk State Medical University, Omsk, Russian Federation. Scopus Author ID 57189104536

Aleksandr L. Khokhlov – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doct. of Sci. (Med.), Professor, Chairman of the UNESCO Department of Clinical Pharmacology and Ethics of Medicines, Yaroslavl State Medical University, Yaroslavl, Russian Federation. <http://orcid.org/0000-0002-0032-0341>. Scopus Author ID: 7201745706

Nikita N. Khromov-Borisov – Cand. of Sci. (Biol.), senior researcher, V.A. Almazov National Medical Research Center, St. Petersburg, Russian Federation. <http://orcid.org/0000-0001-6435-7218>. Scopus Author ID 7003518614

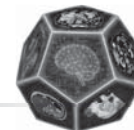
Zhanna V. Sheikh – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Radiology and Medical Imaging, Faculty of Continuing Medical Education, Medical Institute, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba; Professor at the Department of Radiology, Russian Medical Academy of Continuing Professional Education; Professor at the Department of Diagnostic Radiology, Russian State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center (Moscow, Russian Federation), Medical and Biological University of Innovation and Continuing Education, Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-1334-6652>. Scopus Author ID 57285215600

Andrey L. Yudin – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Chairman of the Department of Diagnostic Radiology and Therapy, Medicine and Biology Division, N.I. Pirogov Russian national research medical university, Moscow, Russian Federation. <http://orcid.org/0000-0002-0310-0889>. Scopus Author ID 7102669707

Nicholas C. Gourtsoyiannis – International Member of the Russian Academy of Sciences, M.D., Ph.D., Professor, Director of European School of Radiology, Athens, Greece. Scopus Author ID: 24369117700

Rainer Riemmler – International Member of the Russian Academy of Sciences, M.D., Ph.D., Professor, Professor at the Radiology Department, Medical University of Graz, Graz, Austria. <https://orcid.org/0000-0002-6068-5027>. Scopus Author ID 7003654650

Yang Qin – Ph.D., Head of the Group of Functional Reconstructive Surgery of the Esophagus and Stomach City Clinical Hospital No. 1, Fujian Medical University Fuzhou, China.



Reg. № ПИ № ФС-77-21017, 12.05.05

The Journal is included in the "List of leading peer-reviewed editions, recommended for publication of Candidate's and Doctor's degree theses main results" approved by Higher Attestation Commission (VAC) RF.
The Journal is included in the **Scopus** bibliographic and abstract database.

For inquiries relating to the publication, please contact:

27, Bol'shaya Serpukhovskaya str., 117997, Moscow, Russian Federation. A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery (Amiran Sh. Revishvili)

E-mail: nudnov@rncrr.ru Phone: +7-495-334-29-60 (Nikolay V. Nudnov)

<https://medvis.rdsmedia.ru/>

RDS-Media Ltd. <https://www.rdsmedia.ru>

The editorial board is not responsible for advertising content

No part of this copyrighted work may be reproduced,
modified or distributed, without the prior written permission

Format 60 × 90 1/8. 18 printer's sheet. Circulation: 1500 ex. Free price.
Printed at "Foliant" Ltd.
Signed for printing: 30.09.2026

Editing T.I. Lukovskaya

Designer O.A. Rychenkova, Yu.A. Kushel

Prepress Yu.A. Kushel

«MEDICAL VISUALIZATION»

© RDS-Media Ltd., 2026

All rights reserved



Содержание

Головной мозг

12

Взаимосвязь поглощения ^{11}C -метионина на предоперационной ПЭТ, флуоресценции с хлорином е6 и патоморфологической картины при злокачественных глиальных опухолях головного мозга – значение для хирургического лечения

Рында А.Ю., Олюшин В.Е., Ростовцев Д.М.,
Забродская Ю.М., Улитин А.Ю., Папаян Г.В.

26

Гипераммониемическая энцефалопатия на фоне острой дисфункции печени у пациентов с сепсисом: анализ нейровизуализационных паттернов

Талыбов Р.С., Трофимова Т.Н.,
Клещевникова Т.М., Фёдоров Н.М.

Сердце и сосуды

38

Состояние фиброзной покрышки атеросклеротической бляшки сонных артерий: возможности ультразвуковой диагностики и значение для стратификации риска ишемического инсульта

Тимина И.Е., Балахонова Т.В.,
Чечеткин А.О., Шульгина Л.Э.

50

Предоперационные факторы риска фибрилляции предсердий и оценка вероятности ее возникновения в раннем послеоперационном периоде после коррекции тяжелого аортального стеноза на основании ультразвукового метода исследования

Тарасевич С.В., Жерко О.М., Галицкая С.С.,
Крачак Д.И., Красько О.В.

Брюшная полость и забрюшинное пространство

64

Методика выполнения чрескожной таргетной биопсии опухолей поджелудочной железы под ультразвуковым контролем с применением данных низкодозной перфузионной КТ в качестве навигации в режиме fusion (методические рекомендации)

Джигкаева М.М., Лагуева И.Д.,
Рагимов В.А., Нуднов Н.В., Солодкий В.А.

Мочевыделительная система

74

Двухуровневая система дифференциальной диагностики солидных новообразований почек на основе мультипараметрического ультразвукового и томографического анализа: разработка и внутренняя валидация критериев

Сажина А.А., Васильева И.В., Ратников В.А.,
Удалов Ю.Д., Степанова Ю.А.

90

Роль ПЭТ/КТ мочевого пузыря с ^{11}C -холином в диагностике позднего лучевого цистита (пилотное исследование)

Бердичевский Б.А., Зубик Г.В., Павлова И.В.,
Гоняев А.Р., Учаев Д.А., Корабельников М.А.

Акушерство и гинекология

97

Прогностические параметры гемодинамики матки у беременных I триместра после лечения хронического эндометрита

Озерская И.А., Порховатый С.Я.,
Казарян Г.Г., Ожогина Е.В.

Костно-мышечная система

109

Позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с компьютерной томографией, с ^{18}F -фтордезоксиглюкозой в диагностике множественной миеломы

Манукова В.А., Асланиди И.П.,
Мухортова О.В., Пурсанова Д.М.,
Шурупова И.В., Метелкина М.В.,
Румянцев А.С., Соловьев М.В.,
Менделеева Л.П.

Радиомика и технологии искусственного интеллекта

124

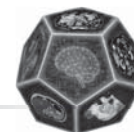
Дифференциальная диагностика липом и атипичных липоматозных опухолей (ALT) конечностей: мультицентровое исследование с использованием моделей машинного обучения на основе радиомических и семиотических признаков бесконтрастной МРТ

Уразов А.В., Аксенова С.П., Нуднов Н.В.,
Харченко Н.В., Сергеев Н.И.

136

Радиомические маркеры прогноза и ответа опухолей головы и шеи при применении химиолучевой и системной противоопухолевой терапии

Борискина К.П., Нечаев В.А., Носова М.В.,
Стативко О.А., Покатаев И.А.



Contents

Brain

- 12** The relationship between the absorption of ^{11}C methionine on preoperative PET, fluorescence with chlorin-e6, and the pathomorphological picture in malignant glial brain tumors – role for surgical treatment

Artemii Yu. Rynda, Viktor Y. Olyushin, Dmitry M. Rostovtsev, Yulia M. Zabrodskaya, Alexey Yu. Ulitin, Garry V. Papayan

- 26** Hyperammonemic encephalopathy associated with acute liver dysfunction in patients with sepsis: evaluation of neuroimaging features

Rustam S. Talybov, Tatyana N. Trofimova, Tatyana M. Kleshchevnikova, Nikolay M. Fedorov

Heart and vessels

- 38** Fibrous cap state in carotid atherosclerotic plaque: Ultrasound diagnostic capabilities and implication for ischemic stroke risk stratification

Irina E. Timina, Tatyana V. Balakhonova, Andrey O. Chechetkin, Ludmila E. Shulgina

- 50** Preoperative risk factors for atrial fibrillation and assessment of the likelihood of its occurrence in the early postoperative period after correction of severe aortic stenosis based on ultrasound examination

Svetlana V. Tarasevich, Olga M. Zherko, Svetlana S. Galitskaya, Dmitry I. Krachak, Olga V. Krasko

Abdomen and retroperitoneum

- 64** A technique for performing ultrasound-guided percutaneous targeted biopsy of pancreatic tumors using low-dose perfusion CT data for fusion-mode navigation (methodological recommendations)

Marina M. Dzhigkaeva, Irina D. Lagkueva, Vadim A. Ragimov, Nikolay V. Nudnov, Vladimir A. Solodkiy

Urinary system

- 74** A two-level system for differential diagnosis solid renal tumors based on multiparametric ultrasonic and tomographic analysis: development and internal validation of criteria

Anna A. Sazhina, Irina V. Vasilieva, Vyacheslav A. Ratnikov, Yuri D. Udalov, Yulia A. Stepanova

- 90** The role of ^{11}C -Choline PET/CT scanning of the bladder in the diagnosis of late radiation cystitis (pilot study)

Boris A. Berdichevsky, Grigory V. Zubik, Irina V. Pavlova, Artem R. Gonyaev, Daniil A. Uchaev, Mikhail A. Korabelnikov

Obstetrics and gynecology

- 97** Predictive uterine hemodynamic parameters in the first trimester of pregnancy following treatment for chronic endometritis

Irina A. Ozerskaya, Sergey Ya. Porkhovaty, Gayane G. Kazaryan, Ekaterina V. Ozhogina

Musculoskeletal system

- 109** PET/CT with ^{18}F -fluorodeoxyglucose diagnosis of multiple myeloma

Veronika A. Manukova, Irakli P. Aslanidis, Olga V. Mukhortova, Diana M. Pursanova, Irina V. Shurupova, Maria V. Metelkina, Alexander S. Rumyantsev, Maxim V. Solovov, Larisa P. Mendeleeva

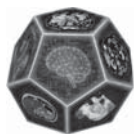
Radiomics and artificial intelligence technologies

- 124** Differential diagnosis of lipomas and atypical lipomatous tumors (ALT) of the extremities: a multicenter study using machine learning models based on radiomic and semiotic features of non-contrast MRI

Aleksandr V. Urazov, Svetlana P. Aksenova, Nikolay V. Nudnov, Natalia V. Kharchenko, Nikolay I. Sergeev

- 136** Prognostic and predictive radiomic markers in head and neck cancer patients receiving chemoradiotherapy and systemic therapy

Ksenia P. Boriskina, Valentin A. Nechaev, Margarita V. Nosova, Olesya A. Stativko, Ilya A. Pokataev



Взаимосвязь поглощения ^{11}C -метионина на предоперационной ПЭТ, флуоресценции с хлорином е6 и патоморфологической картины при злокачественных глиальных опухолях головного мозга – значение для хирургического лечения

© Рында А.Ю.^{1*}, Олюшин В.Е.¹, Ростовцев Д.М.¹, Забродская Ю.М.^{1, 3}, Улитин А.Ю.^{1, 2, 3}, Папаян Г.В.^{1, 4}

¹ Российский научно-исследовательский нейрохирургический институт имени профессора А.Л. Поленова – филиал ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова” Минздрава России; 191014 Санкт-Петербург, ул. Маяковская, д. 12, Российская Федерация

² Институт медицинского образования ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова” Минздрава России; 197341 Санкт-Петербург, Коломяжский пр., д. 21, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО “Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова” Минздрава России; 191015 Санкт-Петербург, ул. Кирочная, д. 41, Российская Федерация

⁴ ФГБОУ ВО “Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова” Минздрава России; 197022 Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6-8, Российская Федерация

Применение флуорофоров широко используется во флуоресцентно-ориентированной хирургии злокачественных опухолей головного мозга. Позитронно-эмиссионная томография с ^{11}C -метионином [^{11}C] МЕТ-ПЭТ позволяет точно определить границы опухолей головного мозга, однако этот метод не всегда доступен. Мы предположили, что количественная интенсивность флуоресценции, индуцированная хлорином е6, может коррелировать с поглощением [^{11}C] МЕТ-ПЭТ при злокачественных глиомах.

Цель исследования: оценка корреляции между поглощением радиофармпрепарата ^{11}C -метионина на предоперационной ПЭТ и интенсивностью флуоресценции с хлорином е6 во время операции с данными патоморфологического исследования биоптатов в хирургии злокачественных глиальных опухолей головного мозга.

Материал и методы. В это проспективное исследование были включены взрослые пациенты с супратенториальными злокачественными глиомами (Grade III и IV по ВОЗ), которым проводилось предоперационное [^{11}C] МЕТ-ПЭТ-сканирование и хирургическое удаление опухоли с применением флуоресцентной навигации с хлорином е6 второго поколения (фотодитазина). Региональное накопление [^{11}C] МЕТ-ПЭТ в опухоли выражалось как отношение стандартизированного максимального объема накопления к объему накопления в нормальной контралатеральной лобной доле. Интенсивность флуоресценции образцов опухоли измерялась *ex vivo* с помощью программного обеспечения RSS Cam Endo системы флуоресцентного детектирования. Индекс пролиферативной активности Ki-67 и статус мутации IDH оценивались с помощью патоморфологического и иммуногистохимического анализа.

Результаты. Были проанализированы данные 13 пациентов, из них с глиобластомой с IDH диким типом 8 (61,5%) пациентов и анапластической астроцитомой с IDH мутацией 5 (38,5%). При ранжировании интенсивности флуоресценции на 4 группы, группа с самой сильной флуоресценцией показала самые высокие средние значения поглощения [^{11}C] МЕТ-ПЭТ и высоким индексом пролиферативной активности Ki-67. При разделении на участки с видимой и невидимой флуоресценцией участки с видимой флуоресценцией имели значительно более высокое поглощение [^{11}C] МЕТ-ПЭТ и индекс пролиферативной активности Ki-67 по сравнению с участками с невидимой флуоресценцией.

Заключение. При хирургическом лечении глиом видимая флуоресценция, индуцированная флуоресцентами, коррелирует с высоким поглощением [^{11}C] МЕТ-ПЭТ, а также со степенью анаплазии по данным патоморфологического исследования и высоким индексом Ki-67 по данным иммуногистохимического исследования.

Ключевые слова: злокачественные глиомы; [^{11}C] МЕТ-ПЭТ; компьютерная томография; хлорин е6; морфологическая оценка, корреляция

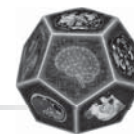
Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Рында А.Ю., Олюшин В.Е., Ростовцев Д.М., Забродская Ю.М., Улитин А.Ю., Папаян Г.В. Взаимосвязь поглощения ^{11}C -метионина на предоперационной ПЭТ, флуоресценции с хлорином е6 и патоморфологической картины при злокачественных глиальных опухолях головного мозга – значение для хирургического лечения. *Медицинская визуализация*. 2026; 30 (3): 12–25. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1651>

Поступила в редакцию: 07.05.2026.

Принята к печати: 3.06.2026.

Опубликована online: 1.10.2026.



The relationship between the absorption of ^{11}C methionine on preoperative PET, fluorescence with chlorin-e6, and the pathomorphological picture in malignant glial brain tumors – role for surgical treatment

© Artemii Yu. Rynda^{1*}, Viktor Y. Olyushin¹, Dmitry M. Rostovtsev¹,
Yulia M. Zabrodskaia^{1, 3}, Alexey Yu. Ulitin^{1, 2, 3}, Garry V. Papayan^{1, 4}

¹ Polenov Russian Scientific Research Institute of Neurosurgery – branch of the Almazov National Medical Research Center of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 12, Mayakovskaya str., Saint Petersburg 191014, Russian Federation

² Institute of Medical Education, Almazov National Medical Research Center of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 21, Kolomyazhsky ave., Saint Petersburg 197341, Russian Federation

³ I.I. Mechnikov NorthWestern State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 41, Kirochnaya str., Saint Petersburg 191015, Russian Federation

⁴ Pavlov First Saint Petersburg State Medical University of the Ministry of Healthcare of Russian Federation; 6-8, L'va Tolstogo str., Saint Petersburg 197022, Russian Federation

Annotation. Fluorophores are widely used in fluorescence-guided surgery for malignant brain tumors. ^{11}C -methionine [^{11}C] MET-PET allows for precise delineation of brain tumor boundaries, but this method is not always available. We hypothesized that the quantitative fluorescence intensity induced by chlorin e6 might correlate with [^{11}C] MET-PET uptake in malignant gliomas.

Purpose. To evaluate the correlation between ^{11}C methionine radiopharmaceutical uptake on preoperative PET and intraoperative chlorin e6 fluorescence intensity with pathological data from biopsy specimens in surgery for malignant glial brain tumors.

Materials and methods. This prospective study included adult patients with supratentorial malignant gliomas (WHO Grades III and IV) who underwent preoperative [^{11}C] MET-PET scanning and surgical resection of the tumor using fluorescence navigation with the second-generation chlorin e6 (Photoditazine). Regional [^{11}C] MET-PET uptake in the tumor was expressed as the ratio of the standardized maximum uptake volume to the uptake volume in the normal contralateral frontal lobe. Fluorescence intensity of tumor samples was measured ex vivo using RSS Cam Endo software and a fluorescence detection system. The Ki-67 proliferative activity index and IDH mutation status were assessed using pathological and immunohistochemical analysis.

Results. This prospective study included adult patients with supratentorial malignant gliomas (WHO Grades III and IV) who underwent preoperative [^{11}C] MET-PET scanning and surgical resection of the tumor using fluorescence navigation with the second-generation chlorin e6 (Photoditazine). Regional [^{11}C] MET-PET uptake in the tumor was expressed as the ratio of the standardized maximum uptake volume to the uptake volume in the normal contralateral frontal lobe. Fluorescence intensity of tumor samples was measured ex vivo using RSS Cam Endo software and a fluorescence detection spectrometric system.

Conclusion. In surgical treatment of gliomas, visible fluorescence induced by fluorescent substances correlates with high [^{11}C] MET-PET uptake, as well as with the degree of anaplasia according to pathological examination and a high Ki-67 index according to immunohistochemistry.

Keywords: malignant gliomas; [^{11}C] MET-PET; computed tomography; chlorin e6; morphological assessment; correlation

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Rynda A.Yu., Olyushin V.E., Rostovtsev D.M., Zabrodskaia Yu.M., Ulitin A.Yu., Papayan G.V. The relationship between the absorption of ^{11}C methionine on preoperative PET, fluorescence with chlorin-e6, and the pathomorphological picture in malignant glial brain tumors - role for surgical treatment. *Medical Visualization*. 2026; 30 (3): 12-25. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1651>

Received: 07.05.2026.

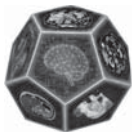
Accepted for publication: 3.06.2026.

Published online: 1.10.2026.

Введение

Злокачественные глиомы – это гетерогенные, диффузные, инфильтративные, высокоагрессивные опухоли, представляющие собой наиболее распространенную группу первичных опухолей головного мозга во всем мире, с высокой летальностью и с одной из самых низких медианой пятилетней выживаемости [1–4]. Быстрое прогрессирование и инвазив-

ный характер роста говорят об агрессивной природе опухоли, что почти всегда приводит к рецидиву опухоли и летальному исходу [2, 5]. С момента внедрения протокола Stupp, включающего адьювантную лучевую и химиотерапию, тотальная резекция стала наиболее значимым модифицируемым фактором прогноза для высокозлокачественных глиом [6, 7]. При этом хирургия глиом должна быть



сбалансирована между возможностью более радикальной резекции и сохранением неврологического статуса пациента. Поэтому достижение максимальной функциональной резекции остается сложной задачей, и, несмотря на современные хирургические методы, тотальная резекция достигается лишь в 15–67% случаев резекции злокачественных глиом [8–10].

Одной из наиболее значимых высокотехнологичных методик, позволяющих определить границу злокачественных глиом и ее биологическое поведение и агрессивность, основаны на метаболической активности опухоли. Такими методиками являются позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) и интраоперационная флуоресцентная навигация с различными индукторами флуоресценции (5-аминолевулиновая кислота, хлорины и т.д.) [11–19].

Чтобы облегчить хирургическое вмешательство при злокачественной глиоме головного мозга, необходимо точное понимание локализации опухоли и ее границы в предоперационном периоде при оценке методов нейровизуализации. Магнитно-резонансная томография (МРТ) с контрастным усилением гадолинием является наиболее распространенным методом диагностики этой активно пролиферирующей инвазивной опухоли. В целом злокачественные глиомы демонстрируют на МР-изображениях активное усиление МР-сигнала по краю и незначительное или полное отсутствие усиления МР-сигнала в зоне некроза (кольцевое усиление) из-за нарушения гематоэнцефалического барьера (ГЭБ) внутри и вокруг опухоли [20–23]. В последнее время сообщается, что ПЭТ с использованием метаболических радиофармпрепаратов, особенно аминокислот, таких как ^{11}C -метионин (^{11}C MET-ПЭТ), позволяет более точно определять границы опухолей головного мозга на предоперационном этапе диагностики и контроля динамики в послеоперационном периоде [23]. Кроме того, поскольку ^{11}C MET-ПЭТ накапливается через транспортеры аминокислот и отражает активный метаболизм клетки, поглощение ^{11}C MET-ПЭТ может происходить без нарушения ГЭБ, что позволяет ^{11}C MET-ПЭТ правильно отображать активность или злокачественность с более точными границами при злокачественной глиоме головного мозга. Однако, несмотря на потенциальные преимущества ^{11}C MET-ПЭТ в диагностике глиобластомы, ее доступность ограничена, поскольку для ^{11}C MET-ПЭТ требуется специальное оборудование, такое как циклотрон, наличие дорогостоящего синтеза радиофармпрепарата (РФП) и ПЭТ-сканера [9, 13, 15, 18, 20].

Учитывая эти данные, мы предположили, что количественная интенсивность флуоресценции, индуцированной хлорином е6, может коррелировать

с поглощением ^{11}C MET-ПЭТ, поскольку оба параметра отражают злокачественность опухолевых клеток. Таким образом, патофизиологической гипотезой данного исследования является выяснение взаимосвязи между предоперационным поглощением ^{11}C MET-ПЭТ и интраоперационной интенсивностью флуоресценции, индуцированной хлорином е6, оцененной количественно во время операции и по образцам опухоли *ex vivo* в различных участках опухолевой ткани, что добавляет новый аспект к изучению флуоресценции, индуцированной хлорином е6, при хирургическом лечении злокачественных глиом.

В данной статье мы представляем первоначальную серию из 13 пациентов с предоперационными положительными при ^{11}C MET-ПЭТ зонами, которым проводилась интраоперационная флуоресцентная навигация с хлорином е6 с последующей патоморфологической оценкой биоптатов, полученных во время операции из разных участков опухолевой ткани (компактная зона, зона некроза, перифокальная зона опухоли) в зависимости от интенсивности видимой флуоресценции во время операции и индекса накопления РФП при проведении предоперационной ^{11}C MET-ПЭТ.

Цель исследования: оценка корреляции между поглощением радиофармпрепарата ^{11}C -метионина при предоперационной ПЭТ и интенсивностью флуоресценции с хлорином е6 во время операции с данными патоморфологического исследования биоптатов, в хирургии злокачественных глиальных опухолей головного мозга.

Материал и методы

В это проспективное исследование были включены пациенты, проходившие лечение в отделении нейрохирургии опухолей головного и спинного мозга Российского научно-исследовательского нейрохирургического института имени профессора А.Л. Поленова. Критериями включения в исследование были: возраст пациента >18 лет, диагноз супратенториальной злокачественной глиомы (впервые диагностированной или рецидивирующей), возможность хирургической резекции опухоли с использованием хлорина е6 и наличие данных ^{11}C MET-ПЭТ, полученных до операции. Случаи биопсии были исключены. Поскольку известно, что злокачественные олигодендроглиомы имеют более высокое поглощение ^{11}C MET-ПЭТ по сравнению с злокачественными астроцитами [9, 18, 20], в окончательный анализ были включены только злокачественные астроцитарные опухоли (анapластические астроцитомы и глиобластомы) (Grade III и Grade IV по данным ВОЗ 2021) [2]. Всего было 13 пациентов: 8 пациентов с глиомой Grade IV (глиобластома) IDH

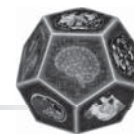


Таблица 1. Клиническая характеристика пациентов

Table 1. Clinical characteristics of patients

Признак / Sign	n
Количество пациентов Number of patients	13
Возраст, годы / Age, years	
границы / limits	34-67
медиана / median	59
Пол/Gender	
мужчины / men	8 (61.5%)
женщины / women	5 (38.5%)
Предоперационный индекс Карновского Preoperative Karnofsky index	
границы / limits	70-90
медиана / median	80
Предоперационный размер опухоли, см ³ Preoperative tumor size, cm ³	
медиана / median	26.9
границы / limits	8.9-79
Преимущественная локализация опухоли Predominant tumor localization	
лобная доля / frontal lobe	3 (23.1%)
теменная доля / parietal lobe	3 (23.1%)
височная доля / temporal lobe	7 (53.8%)
Grade опухоли (ВОЗ) Tumor grade (WHO)	
grade III первичная / grade III primary	4 (30.8%)
grade III рецидив / grade III recurrence	1 (7.7%)
grade IV первичная / grade IV primary	6 (46.1%)
grade IV рецидив / grade IV recurrence	2 (15.4%)

диким типом, 5 пациентов с глиомой Grade III (анapластическая астроцитомы) с IDH мутацией (табл. 1).

Измерения ПЭТ проводились с использованием ПЭТ-сканера ((Biograph, Siemens Healthineers, Германия) и представлялись в виде уравновешенной радиоактивности через 20 мин после внутривенного введения [¹¹C] MET (250–350 МБк). Результат [¹¹C] MET-ПЭТ-сканирования оценивался независимо опытным исследователем-рентгенологом. Различение в поглощении опухолью и неспецифическим накоплением радиофармпрепарата основывалось на комбинированном анализе [¹¹C] MET-ПЭТ и MPT с контрастным усилением от предыдущего нейровизуализационного исследования и клинического анамнеза.

Региональное поглощение [¹¹C] MET-ПЭТ выражалось как стандартизированный объем поглощения (SUV) ((активность ткани (Бк)/объем ткани (мл))/((введенная активность радиоизотопа (Бк)/

масса тела (г))), а поглощение РФП опухолью выражалось как отношение SUV_{max} опухолевой ткани к SUV_{max} нормальной мозговой ткани контралатеральной лобной доли (отношение поражение/нормальная область: отношение L_{max}/N (SUV_{max} опухоль/ SUV_{max} нормальный мозг)). Для определения значения SUV опухолевого участка области интереса размещались вручную. При оценке фоновой активности был выбран нормально выглядящий мозг на контралатеральном полушарии (SUV_{BKG}), и была выполнена оценка данных, включая расчет соотношения опухоль/фон (TBR). Затем были рассчитаны среднее и максимальное соотношение опухоль/фон (TBR_{mean} ; TBR_{max}). Для дифференциации витальной опухоли от неспецифических изменений использовались проверенные пороговые значения TBR.

Методика оценки флуоресцентной навигации во время операции была следующей. Пациентам за 2 ч до предполагаемого вскрытия твердой мозговой оболочки в рамках стандартной процедуры флуоресцентно ориентированной резекции глиомы внутривенно вводили препарат хлорин еб второго поколения (Фотодитазин) производства ООО "BETA-ГРАНД" (Россия) в дозе 1 мг/кг массы тела, разведенный в 200 мл изотонического раствора натрия хлорида. Флакон во время инфузии был обернут в темный светонепроницаемый пергамент во избежание разрушения препарата под воздействием окружающего света. Удаление опухоли проводилось с использованием стандартных нейрохирургических процедур. Образцы опухоли получали из области опухоли с высоким уровнем накопления [¹¹C] MET-ПЭТ в соответствии с системой навигации изображений, используя предоперационные изображения, включая MPT с контрастным усилением гадолинием и данные [¹¹C] MET-ПЭТ. Предоперационные изображения [¹¹C] MET-ПЭТ совмещали с изображениями MPT во время нейронавигации, когда это было возможно. В противном случае изображения [¹¹C] MET-ПЭТ отображались в операционной для просмотра хирургами в любое время.

Для обнаружения фотодитазина использовались микроскоп Leica OHS 1 (Leica Microsystems, Хербруг, Швейцария) и флуоресцентная приставка производства Russia Science Seoul, Korean Electrotechnology Research Institute (KERI) (Сеул, Республика Корея) (разработка Г.В. Папаяна), оснащенная фильтрами для излучения и наблюдения в различных диапазонах длин волн. Также было использовано специальное программное обеспечение RSS Cam – Endo 1.4.313. Использование этого программного обеспечения позволяло производить управление HD-камерой, с помощью которой оценивалась интенсивность флуоресценции в нужном

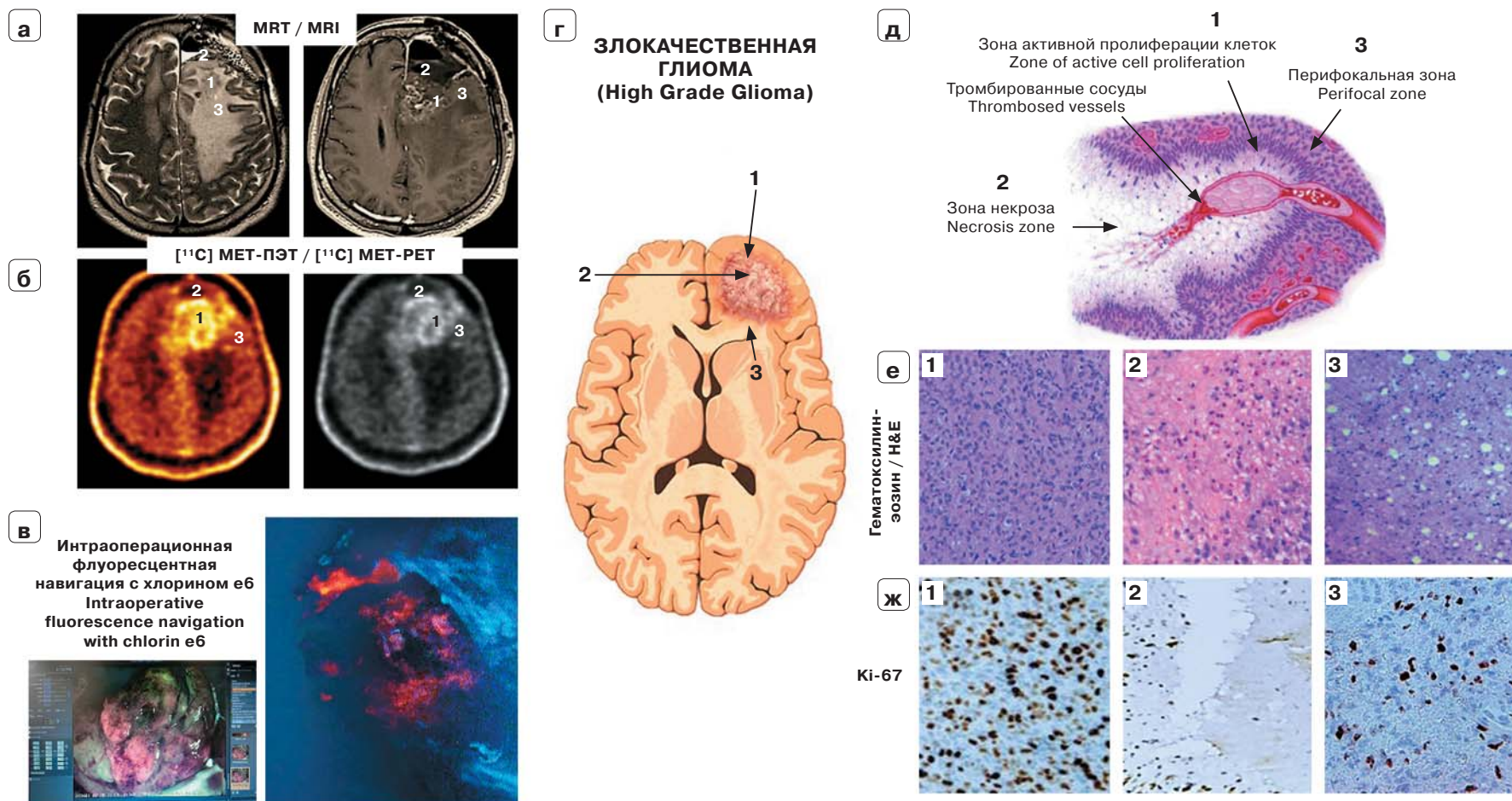
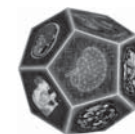
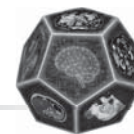


Рис. 1. Схема оценки корреляции между $[^{11}\text{C}]$ МЕТ-ПЭТ, интраоперационной флуоресцентной навигацией и морфологической картиной на базе одного клинического примера. **а** – МРТ головного мозга в режиме DWI и T1-режиме; **б** – $[^{11}\text{C}]$ МЕТ-ПЭТ; **в** – интраоперационная оценка интенсивности флуоресценции с хлорином е6; **г** – графическое изображение оцениваемых участков в структуре злокачественной глиомы; **д** – морфологическая схема оцениваемых участков в структуре злокачественной глиомы; **е** – оценка биоптатов с окраской гематоксилин-эозин ($\times 200$); **ж** – иммуногистохимическая оценка биоптатов с маркером пролиферативной активности Ki-67 ($\times 200$). 1 – зона активной пролиферативной активности (зона компактной части опухоли); 2 – зона некроза опухоли; 3 – перифокальная зона.

Fig. 1. A scheme for assessing the correlation between $[^{11}\text{C}]$ MET-PET, intraoperative fluorescence navigation and morphological picture based on one clinical case. **a** – MRI of the brain in DWI and T1 modes; **б** – $[^{11}\text{C}]$ MET-PET; **в** – intraoperative assessment of fluorescence intensity with chlorin e6; **г** – graphic image of the assessed areas in the structure of a malignant glioma; **д** – morphological scheme of the assessed areas in the structure of a malignant glioma; **е** – assessment of biopsy specimens stained with hematoxylin and eosin ($\times 200$); **ж** – immunohistochemical assessment of biopsy specimens with the proliferative activity marker Ki-67 ($\times 200$). 1 – zone of active proliferative activity (zone of the compact part of the tumor); 2 – zone of tumor necrosis; 3 – perifocal zone.





месте объекта, а также проведение высококачественной видеофиксация и получения фотографических изображений. Так, в режиме реального времени наблюдали изображения в свете флуоресценции как на экране монитора компьютера в программе RSS Cam – Endo 1.4.313, так и через окуляры операционного микроскопа со специально встроенными в него желтыми светофильтрами. Интраоперационная картина в флуоресцентном режиме давала возможность в высоком цветовом контрасте детектировать участки опухоли, накопившие хлорин е6, относительно участков, в котором не было флуорофора.

Оценку видимой визуальной флуоресценции в зависимости от интенсивности свечения проводили по 4-балльной шкале, где 0 – это отсутствие видимой флуоресценции, 1 – слабое свечение (розовое), 2 – умеренное свечение (красное), 3 – сильное свечение (ярко-красное), соответственно по интенсивности свечения участков опухоли все анализируемые участки были разделены на 4 группы (в 1-ю группу вошли участки с отсутствием флуоресценции, во 2-ю группу – со слабым свечением, в 3-ю группу – с умеренным свечением и в 4-ю группу – с сильным свечением).

Согласно классическому закону человеческого восприятия стимулов (закон Вебера-Фехнера), внутреннее субъективное ощущение величины пропорционально логарифму интенсивности стимула. Для облегчения сравнения, таким образом, образцы опухолей по данным программного обеспечения RSS Cam – Endo 1.4.313 были разделены на 4 группы с десятикратными пороговыми значениями в пределах динамического диапазона (отсутствие – <500 а.е.; слабая – 500–4999 а.е.; умеренная – 5000–49999 а.е.; сильная – >50000 а.е.).

Проводились оценка в флуоресцентном режиме зоны некроза опухоли, зоны компактной части опухоли и перифокальной зоны опухоли с забором биоптатов ткани с разной интенсивностью флуоресценции из этих участков и сопоставление места взятия биопсийного материала с данными индекса накопления РФП, полученными в этом месте при предоперационном [^{11}C] MET-ПЭТ-исследовании (рис. 1).

Интенсивность флуоресценции *ex vivo* образцов опухоли измеряли сразу после сбора образца в операционной с помощью программного обеспечения RSS Cam – Endo 1.4.313 и флуоресцентной приставки с HD-камерой. Свежие хирургические образцы опухоли, указанные навигационной системой, были собраны и подвергнуты измерению флуоресценции в операционной. Образцы были разрезаны на кусочки диаметром приблизительно 10 мм перед сканированием флуоресценции.

Все образцы опухолей были подвергнуты патоморфологическому анализу патоморфологами, которые не знали о наличии флуоресценции. Окрашивание гематоксилином и эозином и иммуногистохимия (Ki-67 в качестве индекса пролиферации, IDH1-R132H для выявления мутации изоцитратдегидрогеназы) использовались в рамках рутинных процедур для постановки окончательного диагноза в соответствии с классификацией опухолей центральной нервной системы ВОЗ.

Статистический анализ

Интенсивность флуоресценции сравнивали с помощью непараметрического анализа. Для сравнения двух и нескольких групп использовали непарный t-критерий и однофакторный дисперсионный анализ. Кроме того, для проверки частоты встречаемости двух переменных применяли критерий χ^2 Пирсона. Все значения *p* были двусторонними, и значения *p* < 0,05 считались статистически значимыми. Все статистические анализы проводились с использованием программы JMP версии 14.2.0 (SAS Institute Inc., США).

Результаты исследования

Сравнивали 4 группы участков опухоли с различной интенсивностью флуоресценции, измеренной интраоперационно и по уровню предоперационного поглощения [^{11}C] MET-PET (рис. 2а). Мы также сравнили 4 группы по уровню флуоресценции по различиям в индексе Ki-67 опухолей (рис. 2б). В группе участков опухоли с сильной флуоресценцией были самые высокие средние значения поглощения [^{11}C] MET-PET и индекса Ki-67 по сравнению с другими группами. Однофакторный дисперсионный анализ отклонил нулевую гипотезу о равенстве всех средних значений. Однако апостериорный анализ не выявил существенных различий между двумя выбранными группами.

Далее разделили опухоли на 2 группы: видимые (включая группы с сильной и умеренной флуоресценцией) и невидимые (слабая и отсутствие флуоресценции), поскольку отметили, что флуоресценция от опухолей *ex vivo* была отчетливо видна при интенсивности выше 5000 а.е. Наш дальнейший анализ взаимосвязи между поглощением [^{11}C] MET-PET или индексом Ki-67 и интенсивностью флуоресценции показал, что в группе видимой флуоресценции наблюдалось значительно более высокое поглощение [^{11}C] MET-PET (рис. 2в) и индекс Ki-67 (рис. 2г) по сравнению с группой невидимой флуоресценции (*p* < 0,002) для поглощения [^{11}C] MET-PET и *p* = 0,0031 для индекса Ki-67, непарный t-тест.

Анализ результатов патоморфологического исследования биоптатов флуоресцентно положитель-

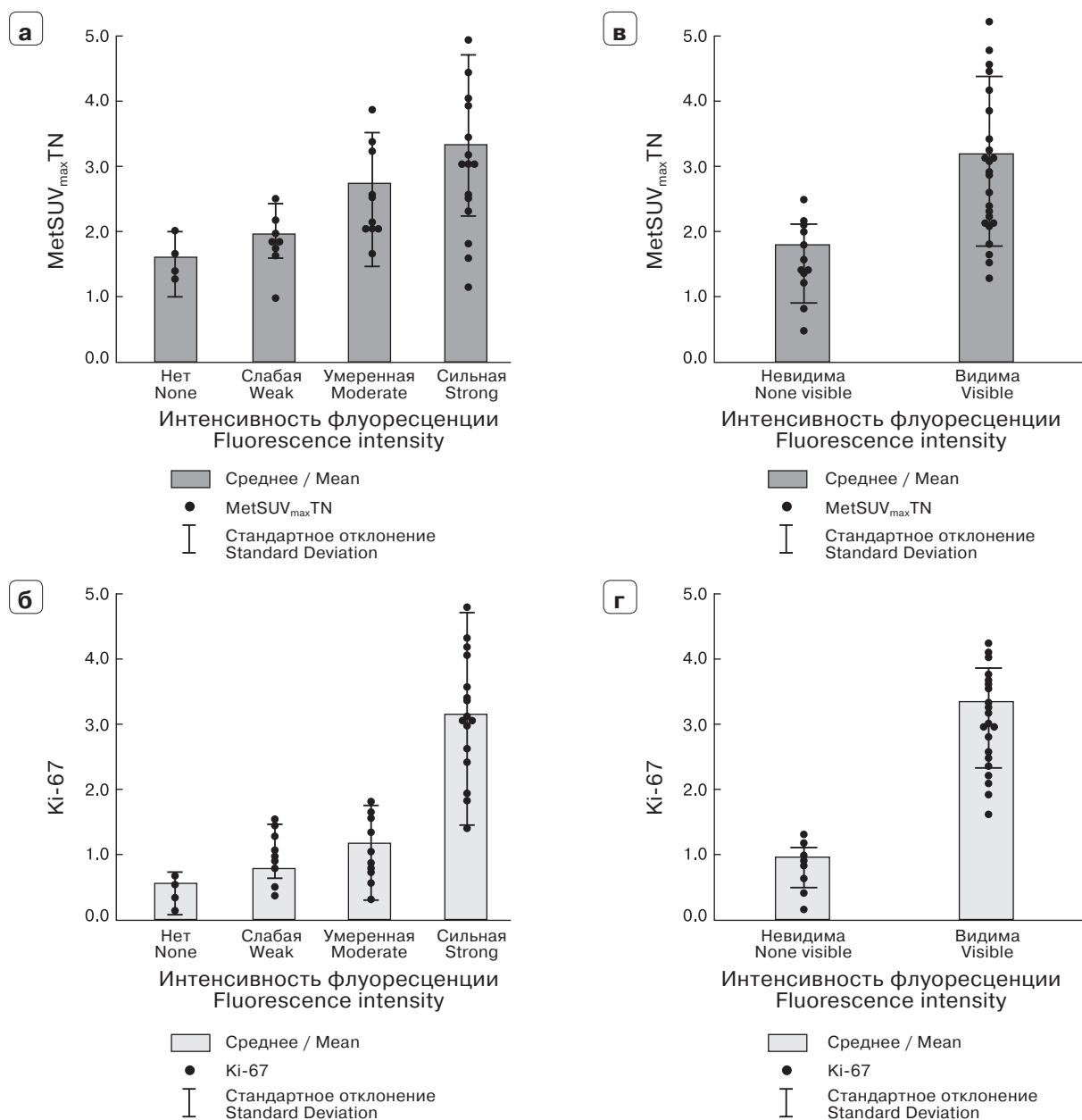


Рис. 2. Зависимость между поглощением [^{11}C] МЕТ-ПЭТ и индексом Ki-67 от количественной интенсивности флуоресценции, индуцированной хлорином е6. (а, б) Сравнение 4-х групп интенсивности флуоресценции. Как [^{11}C] МЕТ-ПЭТ (а), так и индекс Ki-67 (б) были самыми высокими в группе с сильной флуоресценцией. Однофакторный дисперсионный анализ показал, что средние значения 4-х групп не равны как для индекса Ki-67, так и для поглощения [^{11}C] МЕТ-ПЭТ. Однако апостериорный анализ по методу Тьюки не выявил статистической значимости ни в одной случае (в, г). Сравнение двух групп интенсивности флуоресценции, перегруппированных на основе видимости сигнала: видимый (включая группы с сильной и умеренной флуоресценцией) или невидимый (слабый и отсутствующий), для поглощения [^{11}C] МЕТ-ПЭТ (в) и индекса Ki-67 (г). Непарные t-тесты показали значимые различия для поглощения [^{11}C] МЕТ-ПЭТ (в) ($p = 0,002$) и Ki-67 (г) ($p = 0,0031$). Данные представлены в виде средних значений и стандартного отклонения, при этом каждая точка представляет собой опухоль.

Fig. 2. Relationship between [^{11}C] MET-PET uptake and Ki-67 index on quantitative fluorescence intensity induced by chlorin e6. (a, б) Comparison of 4 groups of fluorescence intensity. Both [^{11}C] MET-PET (a) and Ki-67 index (б) were highest in the strong fluorescence group. One-way ANOVA showed that the means of the 4 groups were not equal for both Ki-67 index and [^{11}C] MET-PET uptake. However, Tukey's post hoc analysis did not reveal statistical significance in any case (в, г). Comparison of two fluorescence intensity groups regrouped based on signal visibility: visible (including strong and moderate fluorescence groups) or invisible (weak and absent), for [^{11}C] MET-PET uptake (в) and Ki-67 index (г). Unpaired t-tests showed significant differences for [^{11}C] MET-PET uptake (в) ($p = 0.002$) and Ki-67 (г) ($p = 0.0031$). Data are presented as mean and standard deviation, with each point representing a tumor.

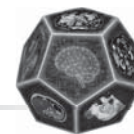


Таблица 2. Патоморфологический анализ участков с различной флуоресценцией и данными ПЭТ

Table 2. Pathological analysis of areas with different fluorescence and PET data

Патоморфологическая характеристика Pathomorphological characteristics	Показатель Indicator	Негативные участки ткани Negative areas tissue		Позитивные участки ткани Positive areas tissue		p
		[¹¹ C] МЕТ-ПЭТ [¹¹ C] MET-PET	хлорин е6 chlorin e6	[¹¹ C] МЕТ-ПЭТ [¹¹ C] MET-PET	хлорин е6 chlorin e6	
Митозы Mitoses	нет/no	1 (50%)	1 (25%)	1 (7.7%)	1 (6.3%)	<0.002
	мало/few	1 (50%)	2 (75%)	7 (53.8%)	6 (37.5%)	
	много/many	0	0	5 (38.5%)	9 (56.2%)	
Ядерный полиморфизм Nuclear polymorphism	низкий/low	1 (50%)	1 (25%)	3 (18.6%)	4 (30.8%)	<0.003
	средний/average	1 (50%)	2 (75%)	11 (68.8%)	8 (61.5%)	
	высокий/high	0	0	2 (12.6%)	1 (7.7%)	
Сосудистая пролиферация Vascular proliferation	есть/there's	1 (50%)	2 (75%)	5 (26.3%)	3 (16.7%)	<0.001
	нет/no	1 (50%)	1 (25%)	14 (73.7%)	15 (83.3%)	
Некрозы Necrosis	есть/there's	1 (50%)	0	16 (88.9%)	15 (83.3%)	<0.003
	нет/no	1 (50%)	3 (100%)	2 (11.1%)	3 (16.7%)	
Ki-67	значение/ meaning	3.2 ± 1.8	4.7 ± 2.5	17.8 ± 3.3	16.5 ± 3.8	<0.002

ных и флуоресцентно отрицательных участков выявил различия в количественном содержании и распределении в ткани опухоли белкового маркера пролиферации Ki-67. Количество белкового маркера пролиферации Ki-67 и развитость сосудистой сети опухоли коррелировало с интенсивностью флуоресценции во время операции и наличием повышенного накопления РФП по данным предоперационного [¹¹C] МЕТ-ПЭТ-сканирования. В исследуемых флуоресцентно и [¹¹C] МЕТ-ПЭТ позитивных участках ткани было обнаружено больше мелких капилляров и опухолевых сосудов с измененным эндотелием (фрагментация эндотелия, увеличение промежутков между клетками) (табл. 2).

Патоморфологическое исследование биоптатов флуоресцентно позитивных и флуоресцентно негативных участков опухолевой ткани, расположенных в зоне некроза опухоли, зоне компактной части опухоли и перифокальной зоне опухоли, показало, что чувствительность метода при сопоставлении данных с интраоперационной интенсивностью флуоресценции и индексом поглощения РФП [¹¹C] МЕТ-ПЭТ и данными результатов патоморфологического и иммуногистохимического исследования для глиом Grade III – 85,1% ([¹¹C] МЕТ-ПЭТ) (p = 0,004) и 81,6% (хлорин е6) (p = 0,002), для Grade IV – 89,7% ([¹¹C] МЕТ-ПЭТ) (p = 0,003) и 86,4% (хлорин е6) (p = 0,002). Специфичность составила для глиом Grade III 70,3% ([¹¹C] МЕТ-ПЭТ) (p = 0,004) и 67,1% (хлорин е6) (p = 0,002), для Grade IV – 89,8% ([¹¹C] МЕТ-ПЭТ) (p = 0,001) и 86,1% (хлорин е6) (p = 0,003) (рис. 3).

Обсуждение

В последние годы флуоресцентная хирургия и ПЭТ стали дополнительными методами визуализации, позволяющими получить представление о биологическом поведении и агрессивности злокачественных глиом. Так, недавние исследования подчеркнули преимущества интеграции ПЭТ и интраоперационной флуоресценции в области мониторинга и хирургического лечения злокачественных глиом [9, 13, 18, 23, 24–27]. Метод комбинированной визуализации ПЭТ и флуоресцентная навигация предоставляют отличную возможность получить всестороннее представление об агрессивности и биологическом поведении опухоли, тем самым повышая точность принятия хирургических решений и оценки прогноза заболевания [15, 28–30].

Использование флуорофоров в флуоресцентном режиме микроскопа является “золотым стандартом” для флуоресцентно ориентированной резекции злокачественных глиом [5, 11, 14, 17]. Во многих исследованиях описано значительное улучшение радикальности резекции злокачественных глиом, которого удалось достичь с помощью высокоспецифичных флуорофоров, что повышает у пациентов как безрецидивную, так и общую выживаемость [16, 21, 27].

Вышеупомянутые результаты исследований подчеркивают потенциал комбинированного использования ПЭТ и флуоресцентной навигации как важнейшего инструмента в определении границ злокачественных глиом, выборе тактики хирургического лечения. Кроме того, они подчеркивают необходи-

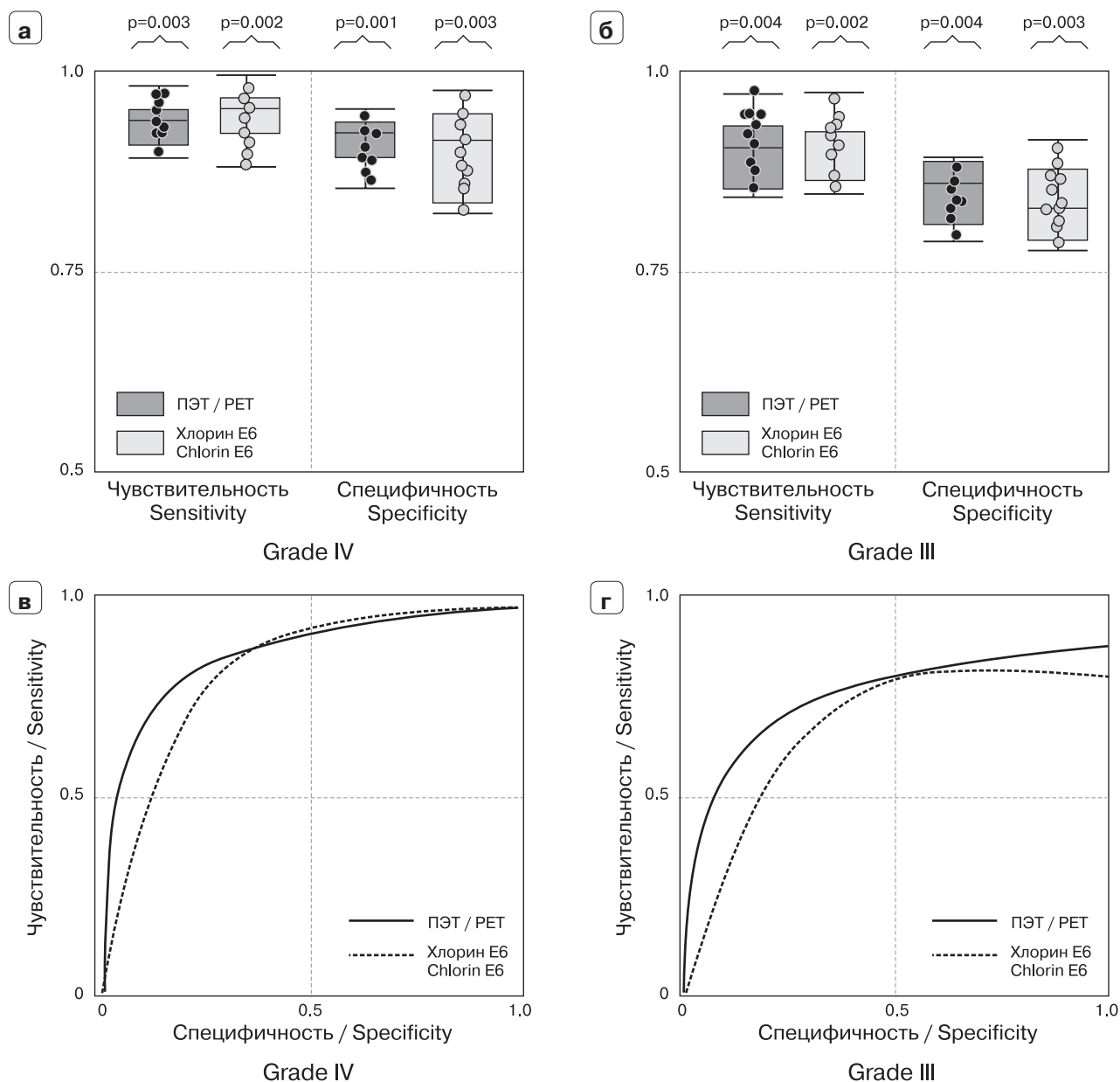
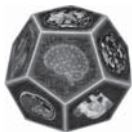
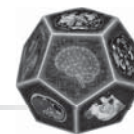


Рис. 3. Чувствительность и специфичность метода флуоресцентной навигации при Grade III и Grade IV глиомах с хлорином е6 в сопоставлении с морфологическими данными и данными поглощения $[^{11}\text{C}]$ МЕТ-ПЭТ при ПЭТ-сканировании. **а** – оценка чувствительности и специфичности методик ($[^{11}\text{C}]$ МЕТ-ПЭТ и флуоресцентной навигации) при глиомах Grade IV; **б** – оценка чувствительности и специфичности методик ($[^{11}\text{C}]$ МЕТ-ПЭТ и флуоресцентной навигации) при глиомах Grade III; **в** – чувствительность и специфичность методики $[^{11}\text{C}]$ МЕТ-ПЭТ и флуоресцентной хирургии с хлорином е6 при глиомах Grade IV в сопоставлении с морфологическими данными; **г** – чувствительность и специфичность методики $[^{11}\text{C}]$ МЕТ-ПЭТ и флуоресцентной хирургии с хлорином е6 при глиомах Grade III в сопоставлении с морфологическими данными.

Fig. 3. Sensitivity and specificity of the fluorescence navigation method in Grade III and Grade IV gliomas with chlorin E6 in comparison with morphological data and $[^{11}\text{C}]$ MET-PET absorption data in PET scanning. **a** – evaluation of sensitivity and specificity of the techniques ($[^{11}\text{C}]$ MET-PET and fluorescence navigation) in Grade IV gliomas; **b** – evaluation of sensitivity and specificity of the techniques ($[^{11}\text{C}]$ MET-PET and fluorescence navigation) in Grade III gliomas; **v** – sensitivity and specificity of the $[^{11}\text{C}]$ MET-PET technique and fluorescence surgery with chlorin e6 in Grade IV gliomas in comparison with morphological data; **r** – sensitivity and specificity of the $[^{11}\text{C}]$ MET-PET technique and fluorescence surgery with chlorin e6 in Grade III gliomas in comparison with morphological data.



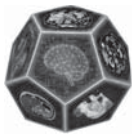
мость дополнительных исследований для полного понимания клинической значимости этого метода [9, 13, 18, 20].

На сегодня существует лишь несколько исследований, сообщающих о сочетании флуоресцентной навигации и [^{11}C] МЕТ-ПЭТ, и вообще нет сообщений относительно сравнительного анализа [^{11}C] МЕТ-ПЭТ с флуоресцентом хлорином е6. Индуцированная флуорофорами флуоресценция и [^{11}C] МЕТ-ПЭТ коррелировали с плотностью клеток при окраске гематоксилин-эозином и индексом Ki-67. [^{11}C] МЕТ-ПЭТ имела высокую чувствительность к обнаружению ткани опухоли, как и флуоресцентная хирургия с хлорином е6 второго поколения (фотодитазином), а известно, что поглощение метионина коррелирует с пролиферацией клеток. Однако одной из существенных проблем при оценке индуцированной флуорофорами флуоресценции является то, что флуоресценция часто оценивается лишь субъективно как “положительная” или “отрицательная” [8, 20, 26, 31]. Здесь мы сообщаем о прямой количественной корреляции между поглощением [^{11}C] МЕТ-ПЭТ и интенсивностью, индуцированной хлорином е6 флуоресценции. В нашем исследовании использовалась методика измерения флуоресценции *ex vivo* на основе данных, полученных при детектировании флуоресценции с помощью программного обеспечения RSS Cam – Endo 1.4.313, и интенсивность флуоресценции была количественно классифицирована, что позволило провести объективное сравнение с данными [^{11}C] МЕТ-ПЭТ. Результаты показали, что поглощение [^{11}C] МЕТ-ПЭТ было значительно выше в образцах опухолей с количественно подтвержденной флуоресценцией, индуцированной хлорином е6, что указывает на корреляцию между этими факторами в злокачественных глиальных опухолях. Кроме того, индекс клеточной пролиферации Ki-67 был значительно повышен в флуоресцентных образцах. Что касается Ki-67, то в предыдущих исследованиях сравнивался индекс Ki-67 с количественно определенной концентрацией протопорфирина IX (а не флуоресценцией) в хирургических образцах и где получили результаты, аналогичные нашим [20, 26, 29, 32]. Но ни в одном другом исследовании не было сообщения об использовании хлорина е6 в качестве фотосенсибилизатора, в подавляющем большинстве (более 98%) исследований сообщается об использовании в качестве индуктора флуоресценции аминолевулиновой кислоты при сравнительном анализе с поглощением [^{11}C] МЕТ при ПЭТ [20, 26, 28, 31, 32]. Эти результаты можно интерпретировать как отражение флуоресценции, индуцированной

хлорином е6, в агрессивности опухоли, что подтверждает надежность системы обнаружения флуоресценции в данном исследовании.

Механизм корреляции между локальным тканевым поглощением ^{11}C -метионином и хлорином е6 до сих пор не изучен. Экспрессия L-типа аминокислотного транспортера 1 (LAT1: SLC7A5) в глиоме человека коррелирует с поглощением [^{11}C] МЕТ. С другой стороны, поглощение хлорина е6 происходит пассивно через встроенные в клеточную мембрану активные транспортеры, включая пептидные транспортеры (ABCC1, ABCC6, PEPT1, PEPT2), протон-сопряженный аминокислотный транспортер 1 (PAT1: SLC36A1) и Na^+ и Cl^- зависимый транспортер таурина (TAUT: SLC6A6) [20, 26, 31–34]. Затем хлорин е6 выводится через АТФ-связывающий кассетный транспортер ABCG2. Хотя некоторые из этих транспортеров образуют суперсемейство генов SLC, насколько нам известно, нет прямых доказательств того, что эти транспортеры, задействованные при поглощении метионина и хлорина е6, взаимодействуют друг с другом [31, 32, 34]. Необходимы дальнейшие исследования для выяснения механизмов, лежащих в основе взаимосвязи между поглощением метионина и хлорина е6.

Ограничением данного исследования является то, что местоположение образца опухоли могло не точно совпадать с предоперационными изображениями на [^{11}C] МЕТ-ПЭТ из-за смещения мозга, произошедшего во время операции. Поэтому, если это было возможно, мы использовали образец, демонстрирующий наиболее сильную флуоресценцию, для корреляции с $\text{SUV}_{\max}$ [^{11}C] МЕТ-ПЭТ. Из-за ограниченного динамического диапазона в программном обеспечении RSS Cam – Endo 1.4.313 относительно выраженной яркости флуоресценции, индуцированной хлорином е6, в некоторых случаях наши данные об интенсивности флуоресценции не могли быть использованы в качестве непрерывного значения. Следовательно, точки данных были распределены несколько неравномерно между группами интенсивности флуоресценции, что затрудняло статистический анализ. Кроме того, поглощение [^{11}C] МЕТ-ПЭТ рассчитывалось как отношение $\text{SUV}_{\max}$ опухолевой ткани к $\text{SUV}_{\max}$ нормальной области мозга. Соответственно, рассчитанные значения могут выглядеть меньше по сравнению с отчетами, в которых $\text{SUV}_{\max}$ опухолевой ткани делится на среднее значение SUV нормальной области мозга. Тем не менее применение одного и того же метода на протяжении всего анализа в рамках всей когорты делает данные об уровне поглощения [^{11}C] МЕТ-ПЭТ, полученные в данном исследовании, достоверными.



Таким образом, настоящее исследование продемонстрировало корреляцию между предоперационным поглощением [^{11}C] МЕТ-ПЭТ и индексом Ki-67 по сравнению с интенсивностью интраоперационной флуоресценции *ex vivo* при хирургическом лечении злокачественных глиом. Видимая флуоресценция, индуцированная хлорином е6, может указывать на место с высоким поглощением [^{11}C] МЕТ-ПЭТ. Учитывая широкую клиническую доступность методики с использованием хлорина е6, наши результаты могут быть полезны для быстрого получения информации о биологии опухоли (например, об агрессивности) во время операции в случаях, когда [^{11}C] МЕТ-ПЭТ недоступна. Кроме того, интраоперационное количественное измерение удаленных опухолей может информировать хирурга о наличии жизнеспособных опухолевых клеток на краях резекции и помочь в принятии решений, направленных на максимизацию объема резекции во время хирургического лечения злокачественной глиомы головного мозга.

Заключение

При хирургическом лечении глиом видимая флуоресценция, индуцированная флуоресцентами, коррелирует с высоким поглощением [^{11}C] МЕТ-ПЭТ, а также со степенью анаплазии по данным патоморфологического исследования и высоким индексом Ki-67 по данным иммуногистохимического исследования. Это количественное биологическое наблюдение может открыть новые возможности для применения флуоресцентно ориентированной хирургии опухолей головного мозга с использованием флуорофоров, в частности хлорина е6.

Участие авторов

Рында А.Ю. – создание опубликованной работы, проведение исследования, написание текста, сбор и обработка данных, подготовка и редактирование текста.

Олюшин В.Е. – создание опубликованной работы, проведение исследования, написание текста, сбор и обработка данных, подготовка и редактирование текста, утверждение окончательного варианта статьи.

Ростовцев Д.М. – создание опубликованной работы, проведение исследования, написание текста, сбор и обработка данных, подготовка и редактирование текста.

Забродская Ю.М. – создание опубликованной работы, проведение исследования, написание текста, сбор и обработка данных, подготовка и редактирование текста.

Улитин А.Ю. – участие в научном дизайне, ответственность за целостность всех частей статьи, подготовка и редактирование текста.

Папаян Г.В. – проведение исследования, написание текста, сбор и обработка данных, подготовка и редактирование текста.

Authors' participation

Rynda A.Yu. – authoring the published article, conducting the research, writing the text, collecting and processing data, preparing and editing the text.

Olyushin V.E. – authoring the published article, conducting the research, writing the text, collecting and processing data, preparing and editing the text, and approving the final version of the article.

Rostovtsev D.M. – authoring the published article, conducting the research, writing the text, collecting and processing data, preparing and editing the text.

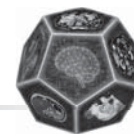
Zabrodsckaya Yu.M. – authoring the published article, conducting the research, writing the text, collecting and processing data, preparing and editing the text.

Ulitin A.Yu. – participation in the scientific design, responsibility for the integrity of all parts of the article, preparing and editing the text.

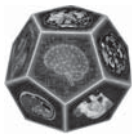
Papayan G.V. – conducting the research, writing the text, collecting and processing data, preparing and editing the text.

Список литературы [References]

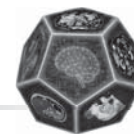
- Ostrom Q.T., Cioffi G., Waite K. et al. CBTRUS statistical report: primary brain and other central nervous system tumors diagnosed in the United States in 2014–2018. *Neuro-Oncology*. 2021; 23: III1–III105. <https://doi.org/10.1093/NEUONC/NOAB200>
- Louis D.N., Perry A., Wesseling P. et al. The 2021 WHO classification of tumors of the central nervous system: A summary. *Neuro-Oncology*. 2021; 23: 1231–1251. <https://doi.org/10.1093/neuonc/noab106>
- Рында А.Ю., Олюшин В.Е., Ростовцев Д.М. и др. Пациенты с длительной выживаемостью при злокачественных глиомах после фотодинамической терапии. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2024; 124 (6): 54–61. <https://doi.org/10.17116/jnevro202412406154>
- Рында А.Ю., Папуша Л.И., Антонецкая Т.Л., Ворожцов И.Н., Грачев Н.С., Лопатин А.В., Санакоева А.В., Тараканова А.В., Терещенко Г.В. Диагностика инфантильной полушарной глиомы с применением комбинированной (пред- и интраоперационной) нейронавигации: клинический случай. *Вопросы современной педиатрии*. 2026; 25 (2): 78–87. <https://doi.org/10.15690/vsp.v25i2.3020>
- Рында А.Ю., Олюшин В.Е., Ростовцев Д.М., Забродская Ю.М., Улитин А.Ю., Папаян Г.В. Использование флуоресцентной навигации и эндоскопической ассистенции в хирургии глиобластом головного мозга. *Журнал "Вопросы нейрохирургии" имени*



- H.H. Бурденко. 2025; 89 (6): 28–37. <https://doi.org/10.17116/neiro20258906128>
- Rynda A.Yu., Olyushin V.E., Rostovtsev D.M. et al. Fluorescence navigation and endoscopic assistance in surgery for brain glioblastomas. *Burdenko's Journal of Neurosurgery*. 2025; 89 (6): 28–37. <https://doi.org/10.17116/neiro20258906128> (In Russian)
6. Stupp R., Mason W.P., van den Bent M.J. et al. Radiotherapy plus concomitant and adjuvant temozolomide for glioblastoma. *N. Engl. J. Med.* 2005; 352: 987–996. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa043330>
 7. Rynda A.Y., Rostovtsev D.M., Zabrodskaya Y.M. et al. Immunotherapy with autologous dendritic cells in the complex treatment of malignant gliomas – results. *J. Neurooncol.* 2024; 166: 309–319. <https://doi.org/10.1007/s11060-023-04559-1>
 8. Albert N.L., Galldiks N., Ellingson B.M. et al. PET-based response assessment criteria for diffuse gliomas (PET RANO 1.0): a report of the RANO group. *Lancet Oncol.* 2024; 25: e29–e41. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(23\)00525-9](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(23)00525-9)
 9. Беляев А.Ю., Вихрова Н.Б., Калаева Д.Б., Баталов А.И., Афандиев Р.М., Галстян С.А., Кобяков Г.Л., Пронин И.Н., Усачев Д.Ю. ПЭТ-КТ с ^{11}C -метионином в диагностике анапластических астроцитом и анапластических олигодендроглиом. *Медицинская визуализация*. 2022; 26 (4): 82–92. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1170>
 - Belyaev A.Y., Vikhrova N.B., Kalaeva D.B. et al. ^{11}C -methionine PET-CT in the diagnosis of anaplastic astrocytomas and anaplastic oligodendrogliomas. *Medical Visualization*. 2022; 26 (4): 82–92. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1170> (In Russian)
 10. Nguyen T.T.T., Mnatsakanyan H., Yi E., Badr C.E. Current and Emerging Fluorescence-Guided Techniques in Glioma to Enhance Resection. *Cancers*. 2025; 17 (16): 2702. <https://doi.org/10.3390/cancers17162702>
 11. Goryaynov S.A., Buklina S.B., Khapov I.V. et al. 5-ALA-guided tumor resection during awake speech mapping in gliomas located in eloquent speech areas: Single-center experience. *Front. Oncol.* 2022; 12: 940951. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.940951>
 12. Рында А.Ю., Олюшин В.Е., Ростовцев Д.М., Забродская Ю.М., Тастанбеков М.М., Папаян Г.В. Результаты использования интраоперационного флюоресцентного контроля с хлорином Е6 при резекции глиальных опухолей головного мозга. *Журнал “Вопросы нейрохирургии” имени Н.Н. Бурденко*. 2021; 85 (4): 20–28. <https://doi.org/10.17116/neiro20218504120>
 - Rynda A.Yu., Olyushin V.E., Rostovtsev D.M., et al. Intraoperative fluorescence control with chlorin E6 in resection of glial brain tumors. *Burdenko's Journal of Neurosurgery = Zhurnal “Voprosy neurokhirurgii” imeni N.N. Burdenko*. 2021; 85(4): 20–28. <https://doi.org/10.17116/neiro20218504120> (In Russian)
 13. Пронин И.Н., Хохлова Е.В., Конакова Т.А., Маряшев С.А., Пицхелаури Д.И., Баталов А.И., Постнов А.А. Применение ПЭТ-КТ с ^{11}C -метионином в первичной диагностике глиом. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2020; 120 (8): 51–56. <https://doi.org/10.17116/jnevro202012008151>
 - Pronin I.N., Khokhlova E.V., Konakova T.A. et al. Positron emission tomography with ^{11}C -methionine in primary brain tumor diagnosis. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2020; 120 (8): 51–56. <https://doi.org/10.17116/jnevro202012008151> (In Russian)
 14. Goryaynov S.A., Okhlopov V.A., Golbin D.A. et al. Fluorescence Diagnosis in Neurooncology: Retrospective Analysis of 653 Cases. *Front. Oncol.* 2019; 6: 9: 830. <https://doi.org/10.3389/fonc.2019.00830>
 15. Леонтьев А.В., Рубцова Н.А., Халимон А.И., Хамдеева Г.Ф., Кулиев М.Т., Пылова И.В., Лазутина Т.Н., Костин А.А., Каприн А.Д. Биохимические основы визуализации при позитронной эмиссионной томографии в онкологии. Часть 1. *Медицинская визуализация*. 2019; 4: 114–130. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-2019-4-114-130>
 - Leontyev A.V., Rubtsova N.A., Khalimon A.I. et al. Biochemical basics of imaging in positron emission tomography in oncology. Part 1. *Medical Visualization*. 2019; 4: 114–130. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-2019-4-114-130> (In Russian)
 16. Горяйнов С.А., Потапов А.А., Охлопков В.А., Баталов А.И., Афандиев Р.О., Беляев А.Ю., Аристов А.А., Савельева Т.А., Жуков В.Ю., Лощенов В.Б., Гусев Д.В., Захарова Н.Е. Метаболическая навигация в хирургии опухолей головного мозга: анализ серии 403 пациентов. *Нейрохирургия*. 2022; 24 (4): 46–58. <https://doi.org/10.17650/1683-3295-2022-24-4-46-58>
 - Goryaynov S.A., Potapov A.A., Okhlopov V.A. et al. Metabolic navigation during brain tumor surgery: analysis of a series of 403 patients. *Russian journal of neurosurgery*. 2022; 24 (4): 46–58. <https://doi.org/10.17650/1683-3295-2022-24-4-46-58> (In Russian)
 17. Рында А.Ю., Олюшин В.Е., Ростовцев Д.М., Забродская Ю.М., Папаян Г.В. Флуоресцентная диагностика с хлорином е6 в хирургии глиом низкой степени злокачественности. *Biomedical Photonics*. 2021; 10 (4): 35–43. <https://doi.org/10.24931/2413-9432-2021-10-4-35-43>
 - Rynda A.Yu., Olyushin V.E., Rostovtsev D.M. et al. Fluorescent diagnostics with chlorin e6 in surgery of low-grade glioma. *Biomedical Photonics*. 2021; 10 (4): 35–43. <https://doi.org/10.24931/2413-9432-2021-10-4-35-43> (In Russian)
 18. Shimizu K., Tamura K., Hara S. et al. Correlation of Intraoperative 5-ALA-Induced Fluorescence Intensity and Preoperative ^{11}C -Methionine PET Uptake in Glioma Surgery. *Cancers*. 2022; 14: 1449. <https://doi.org/10.3390/cancers14061449>
 19. Рында А.Ю., Ростовцев Д.М., Олюшин В.Е., Забродская Ю.М. Флюоресцентно-контролируемая резекция глиальных опухолей с “Фотодитазин”. *Вестник хирургии имени И.И. Грекова*. 2017; 176(5): 10–15. <https://doi.org/10.24884/0042-4625-2017-176-5-10-15>
 - Rynda A.Yu., Rostovtsev D.M., Olyushin V.E., Zabrodskaya Yu.M. Fluorescence-guided resection of glioma using “photoditazin”. *Grekov's Bulletin of Surgery*. 2017; 176 (5): 10–15. <https://doi.org/10.24884/0042-4625-2017-176-5-10-15> (In Russian)
 20. Ewelt C., Floeth F.W., Felsberg J. et al. Finding the anaplastic focus in diffuse gliomas: the value of Gd-DTPA enhanced MRI, FET-PET, and intraoperative, ALA-derived tissue fluorescence. *Clin. Neurol.*



- Neurosurg.* 2011; 113: 541-547.
<https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2011.03.008>
21. Рында А.Ю., Олюшин В.Е., Ростовцев Д.М., Забродская Ю.М., Улитин А.Ю., Папаян Г.В. Применение интраоперационной фотодинамической терапии в структуре комплексного лечения злокачественных глиом. *Журнал "Вопросы нейрохирургии" имени Н.Н. Бурденко.* 2023; 87 (1): 25-34. <https://doi.org/10.17116/neiro20238701125>
Rynda A.Yu., Olyushin V.E., Rostovtsev D.M. et al. Intraoperative photodynamic therapy in complex treatment of malignant gliomas. *Burdenko's Journal of Neurosurgery = Zhurnal voprosy neurokhirurgii imeni N.N. Burdenko.* 2023; 87 (1): 25-34. <https://doi.org/10.17116/neiro20238701125> (In Russian)
 22. Huskic S., Lazen P., Cadrien C. et al. Preoperative prediction of 5-ALA fluorescence in gliomas: comparison of 7-Tesla magnetic resonance spectroscopic imaging, contrast-enhancement on MRI, and positron emission tomography. *Eur. Radiol.* 2026; 36 (7): 5469-5481. <https://doi.org/10.1007/s00330-026-12430-w>
 23. Roessler K., Becherer A., Donat M. et al. Intraoperative tissue fluorescence using 5-aminolevulinic acid (5-ALA) is more sensitive than contrast MRI or amino acid positron emission tomography (^{18}F -FET PET) in glioblastoma surgery. *Neurol. Res.* 2012; 34: 314-317. <https://doi.org/10.1179/1743132811Y.00000000078>
 24. Рында А.Ю., Олюшин Д.М., Ростовцев Д.М., Забродская Ю.М., Папаян Г.В. Результаты микрохирургической резекции глиобластом под эндоскопическим и флуоресцентным контролем. *Biomedical Photonics.* 2024; 13(3): 20-30. <https://doi.org/10.24931/2413-9432-2024-13-3-20-30>
Rynda A.Yu., Olyushin V.E., Rostovtsev D.M. et al. Results of microsurgical resection of glioblastomas under endoscopic and fluorescent control. *Biomedical Photonics.* 2024; 13 (3): 20-30. <https://doi.org/10.24931/2413-9432-2024-13-3-20-30> (In Russian)
 25. Рында А.Ю., Олюшин В.Е., Ростовцев Д.М. и др. Возможности интерстициальной фотодинамической терапии в лечении глиобластом головного мозга. *Biomedical Photonics.* 2025; 14 (1): 4-19. <https://doi.org/10.24931/2413-9432-2025-14-1-4-19>
Rynda A.Yu., Olyushin V.E., Rostovtsev D.M. et al. Possibilities of interstitial photodynamic therapy in the treatment of brain glioblastoma. *Biomedical Photonics.* 2025; 14 (1): 4-19. <https://doi.org/10.24931/2413-9432-2025-14-1-4-19> (In Russian)
 26. Stockhammer F., Misch M., Horn P. et al. Association of F18-fluoro-ethyl-tyrosin uptake and 5-aminolevulinic acid-induced fluorescence in gliomas. *Acta Neurochir. (Wien).* 2009; 151: 1377-1383. <https://doi.org/10.1007/s00701-009-0462-7>
 27. Рында А.Ю., Олюшин В.Е., Ростовцев Д.М., Забродская Ю.М., Папаян Г.В. Сравнительный анализ флуоресцентной навигации в хирургии злокачественных глиом с использованием 5-АЛА и хлорина Е6. *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова.* 2022; 1: 5-14. <https://doi.org/10.17116/hirurgia20220115>
Rynda A.Yu., Olyushin V.E., Rostovtsev D.M. et al. Comparative analysis of 5-ALA and chlorin E6 fluorescence-guided navigation in malignant glioma surgery. *Pirogov Russian Journal of Surgery = Khirurgiya. Zhurnal im. N.I. Pirogova.* 2022; 1: 5-14. <https://doi.org/10.17116/hirurgia20220115> (In Russian)
 28. Jaber M., Wölfer J., Ewelt C. et al. The value of 5-aminolevulinic acid in low-grade gliomas and high-grade gliomas lacking glioblastoma imaging features: an analysis based on fluorescence, magnetic resonance imaging, ^{18}F -fluoroethyl tyrosine positron emission tomography, and tumor molecular factors. *Neurosurgery.* 2016; 78: 401-411. <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000001020>
 29. Скворцова Т.Ю., Савинцева Ж.И., Гурчин А.Ф., Холявин А. Может ли метаболическая характеристика диффузной глиомы при ПЭТ/КТ с ^{11}C -метионином служить маркером ее IDH-статуса? Кросс-секционное исследование. *Лучевая диагностика и терапия.* 2024; 15 (1): 35-45.
Skvortsova T.Yu., Savintseva Zh.I., Gurchin A.F., Kholiyavin A.I. Can the metabolic characteristics of diffuse glioma on ^{11}C -methionine PET/CT serve as a marker of its IDH status? Cross sectional study. *Diagnostic Radiology and Radiotherapy.* 2024; 15 (1): 35-45. <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2024-15-1-35-45> (In Russian)
 30. Рында А.Ю., Ростовцев Д.М., Олюшин В.Е., Забродская Ю.М. Лечебный патоморфоз в тканях злокачественной глиомы после фотодинамической терапии с хлорином е6 (сообщение о двух клинических случаях). *Biomedical Photonics.* 2020; 9 (2): 45-54. <https://doi.org/10.24931/2413-9432-2020-9-2-45-54>
Rynda A.Yu., Rostovtsev D.M., Olyushin V.E., Zabrodskaya Yu.M. Therapeutic pathomorphosis in malignant glioma tissues after photodynamic therapy with chlorin e6 (reports of two clinical cases). *Biomedical Photonics.* 2020; 9(2): 45-54. <https://doi.org/10.24931/2413-9432-2020-9-2-45-54> (In Russian)
 31. Hautiere M., Vivier D., Dorval P. et al. Preoperative PET imaging and fluorescence-guided surgery of human glioblastoma using dual-labeled antibody targeting ETA receptors in a preclinical mouse model: A therapeutic approach. *Theranostics.* 2024; 14 (16): 6268-6280. <https://doi.org/10.7150/thno.98163>
 32. Galldiks N., Lohmann P., Friedrich M. et al. PET imaging of gliomas: Status quo and quo vadis? *Neuro-Oncology.* 2024; 26 (9): S185-S198. <https://doi.org/10.1093/neuonc/noae078>
 33. Рында А.Ю., Забродская Ю.М., Олюшин В.Е., Ростовцев Д.М., Соколова Т.В., Папаян Г.В. Морфологическая оценка эффективности флуоресцентной навигации с хлорином е6 в хирургии злокачественных глиом. *Архив патологии.* 2021; 83 (5): 13-20. <https://doi.org/10.17116/20218305113>
Rynda A.Yu., Zabrodskaya Yu.M., Olyushin V.E. et al. Morphological evaluation of the effectiveness of fluorescence navigation with chlorin e6 in surgery for malignant gliomas. *Russian Journal of Archive of Pathology.* 2021; 83 (5): 13-20. <https://doi.org/10.17116/20218305113> (In Russian)
 34. Rynda A., Olyushin V., Rostovtsev D., Zabrodskaya J. Influence of the expression of ABCG2 transporters on the results of photodynamic therapy in malignant gliomas. *Annals of Oncology.* 2021; 32 (Suppl. 5): S523. <https://doi.org/10.1016/j.annonc.2021.08.026>



Для корреспонденции*: Рында Артемий Юрьевич – e-mail: artemii.rynda@mail.ru

Рында Артемий Юрьевич – канд. мед. наук, нейрохирург, онколог РНХИ имени проф. А.Л. Поленова – филиала ФГБУ “НМИЦ имени В.А. Алмазова” Минздрава России, Санкт-Петербург. <https://orcid.org/0000-0002-3331-4175>

Олюшин Виктор Емельянович – доктор мед. наук, профессор отделения хирургии опухолей головного и спинного мозга №1, главный научный сотрудник НИЛ нейроонкологии РНХИ имени проф. А.Л. Поленова – филиала ФГБУ “НМИЦ имени В.А. Алмазова” Минздрава России, Санкт-Петербург. <https://orcid.org/0000-0002-9960-081X>

Ростовцев Дмитрий Михайлович – доктор мед. наук, отделение хирургии опухолей головного и спинного мозга №1, РНХИ имени проф. А.Л. Поленова – филиала ФГБУ “НМИЦ имени В.А. Алмазова” Минздрава России, Санкт-Петербург. <https://doi.org/0000-0002-8956-7921>

Забродская Юлия Михайловна – доктор мед. наук, заведующая отделением патоморфологии РНХИ имени проф. А.Л. Поленова – филиала ФГБУ “НМИЦ имени В.А. Алмазова” Минздрава России; профессор кафедры патоморфологии, ФГБОУ ВО “СЗГМУ имени И.И. Мечникова” Минздрава России, Санкт-Петербург. <https://orcid.org/0000-0001-6206-2133>

Улитин Алексей Юрьевич – доктор мед. наук, профессор, главный внештатный специалист-нейрохирург Комитета здравоохранения СПб, заведующий кафедрой нейрохирургии Института медицинского образования “НМИЦ имени В.А. Алмазова” Минздрава России; заведующий нейрохирургическим отделением №4 Российского нейрохирургического института имени проф. А.Л. Поленова – филиала ФГБУ “НМИЦ имени В.А. Алмазова” Минздрава России; профессор кафедры нейрохирургии ФГБОУ ВО “СЗГМУ имени И.И. Мечникова” Минздрава России, Санкт-Петербург. <https://orcid.org/0000-0002-8343-4917>

Папаян Гарри Вазгенович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИО микроциркуляции и метаболизма миокарда ФГБУ “НМИЦ имени В.А. Алмазова” Минздрава России, Санкт-Петербург. <https://orcid.org/0000-0002-6462-9022>

Contact*: Artemii Yu. Rynda – e-mail: artemii.rynda@mail.ru

Artemii Yu. Rynda – Cand. of Sci. (Med.), neurosurgeon, oncologist, Polenov Russian Scientific Research Institute of Neurosurgery – branch of the Almazov National Medical Research Center, St. Petersburg. <https://orcid.org/0000-0002-3331-4175>

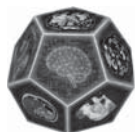
Viktor Y. Olyushin – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Department of Brain and Spinal Cord Tumor Surgery No. 1, Chief Researcher, Neurooncology Research Laboratory, Polenov Russian Scientific Research Institute of Neurosurgery – branch of the Almazov National Medical Research Center, St. Petersburg. <https://orcid.org/0000-0002-9960-081X>

Dmitry M. Rostovtsev – Doct. of Sci. (Med.), Department of Brain and Spinal Cord Tumor Surgery No. 1, Polenov Russian Scientific Research Institute of Neurosurgery – branch of the Almazov National Medical Research Center, St. Petersburg. <https://orcid.org/0000-0002-8956-7921>

Yulia M. Zabrodskaya – Doct. of Sci. (Med.), Head of the Pathomorphology Department, Polenov Russian Scientific Research Institute of Neurosurgery – branch of the Almazov National Medical Research Center; Professor of the Pathomorphology Department, I.I. Mechnikov NorthWestern State Medical University, St. Petersburg. <https://orcid.org/0000-0001-6206-2133>

Alexey Yu. Ulitin – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Chief Neurosurgeon of the St. Petersburg Health Committee, Head of the Neurosurgery Department, Institute of Medical Education, Almazov National Medical Research Center; Head of the Neurosurgery Department No. 4, Polenov Russian Scientific Research Institute of Neurosurgery – branch of the Almazov National Medical Research Center; Professor of the Neurosurgery Department, I.I. Mechnikov NorthWestern State Medical University, St. Petersburg. <https://orcid.org/0000-0002-8343-4917>

Garry V. Papayan – Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Research Institute of Myocardial Microcirculation and Metabolism, Almazov National Medical Research Center, Ministry of Health of the Russian Federation, St. Petersburg. <https://orcid.org/0000-0002-6462-9022>



Гипераммониемическая энцефалопатия на фоне острой дисфункции печени у пациентов с сепсисом: анализ нейровизуализационных паттернов

© Талыбов Р.С.^{1,2*}, Трофимова Т.Н.³, Клещевникова Т.М.¹, Фёдоров Н.М.²

¹ ГБУЗ Тюменской области "Областная клиническая больница №2"; 625039 Тюмень, ул. Мельникайте, д. 75, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО "Тюменский государственный медицинский университет" Минздрава России; 625023 Тюмень, ул. Одесская д. 54, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО "Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова" Минздрава России; 197022, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6-8, Российская Федерация

Цель исследования: охарактеризовать МРТ-семиотику поражения головного мозга у пациентов с гипераммониемической энцефалопатией (ГЭ) на фоне сепсиса и определить характерные нейровизуализационные паттерны.

Материал и методы. В проспективном исследовании был проведен анализ данных и результатов МРТ головного мозга и исходов у 15 пациентов с сепсисом и клинически подтвержденной ГЭ, наблюдавшихся в нашем учреждении. Оценка церебральных изменений выполнялась с использованием стандартного МРТ-протокола. В процессе анализа определяли следующие параметры: локализацию и характер интенсивности МР-сигнала от очагов поражения, наличие или отсутствие рестрикции диффузии, присутствие артефактов искажения магнитного поля, а также обратимость структурных изменений.

Результаты. В ходе анализа нейровизуализации патологические изменения выявлены у всех 15 пациентов. У 13 (86,7%) пациентов зарегистрированы симметричные поражения коры островковых долей и поясных извилин; у 1 (6,7%) пациента отмечены симметричные поражения базальных ганглиев, у 1 (6,7%) пациента зарегистрированы кортико-субкортикальные поражения в больших полушариях головного мозга. Все выявленные поражения характеризовались гиперинтенсивным сигналом на T2/T2-Flair взвешенных изображениях, при оценке диффузионно-взвешенных изображений у всех пациентов наблюдался цитотоксический отек. Всем пациентам выполнялось контрольное МРТ-исследование после коррекции лечения, зафиксирован регресс всех отмеченных изменений на фоне нормализации уровней аммиака, печеночных трансаминаз, лактата, маркеров сепсиса.

Заключение. Проведенное исследование позволило охарактеризовать МРТ-семиотику ГЭ у пациентов с сепсисом и определить ее ключевые нейровизуализационные паттерны. Билатеральный инсулярно-поясной паттерн поражения следует рассматривать в качестве потенциального ценного нейровизуализационного маркера, позволяющего осуществлять раннюю верификацию ГЭ.

Ключевые слова: сепсис; острая дисфункция печени; гипераммониемия; гипераммониемическая энцефалопатия; МРТ

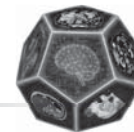
Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Талыбов Р.С., Трофимова Т.Н., Клещевникова Т.М., Фёдоров Н.М. Гипераммониемическая энцефалопатия на фоне острой дисфункции печени у пациентов с сепсисом: анализ нейровизуализационных паттернов. *Медицинская визуализация*. 2026; 30 (3): 26–37. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1664>

Поступила в редакцию: 13.06.2026.

Принята к печати: 27.07.2026.

Опубликована online: 30.09.2026.



Hyperammonemic encephalopathy associated with acute liver dysfunction in patients with sepsis: evaluation of neuroimaging features

© Rustam S. Talybov^{1, 2}, Tatyana N. Trofimova³, Tatyana M. Kleshchevnikova¹, Nikolay M. Fedorov²

¹ Tyumen Regional Clinical Hospital №2; 75, Melnikaite str., Tyumen 625039, Russian Federation

² Tyumen State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 54, Odesskaya str., Tyumen 625023, Russian Federation

³ Pavlov First Saint Petersburg State Medical University of the Ministry of Healthcare of Russian Federation; 6-8, L'va Tolstogo str., Saint Petersburg 197022, Russian Federation

Objective. To investigate characteristic magnetic resonance imaging (MRI) findings of the brain in patients with hyperammonemic encephalopathy (HE) and to identify the main neuroimaging features of this pathology.

Methods. A prospective study analyzed brain MRI data from 15 patients with sepsis and clinically confirmed HE. Assessment of cerebral changes was performed using a standard MRI protocol. The following parameters were evaluated during the analysis: localization and signal intensity characteristics of the lesions on MRI, presence or absence of diffusion restriction, presence magnetic susceptibility artifacts, as well as reversibility of structural changes.

Results. Neuroimaging revealed pathological changes in all 15 patients. In 13 patients (86.7%) had symmetrical lesions of the insular cortex and cingulate gyrus; 1 patient (6.7%) had symmetrical lesions of the basal ganglia; and in 1 patient (6.7%) had cortico-subcortical lesions in the cerebral hemispheres. All detected lesions were characterized by hyperintense signal on T2-weighted and T2-FLAIR images. On diffusion-weighted imaging (DWI), cytotoxic edema was observed in all patients. Follow-up MRI was performed in all patients after treatment adjustment and renal replacement therapy, demonstrating marked regression of all noted changes, concurrent with normalization of serum ammonia, lactate, transaminases, sepsis markers.

Conclusion. The present study characterized the MRI semiotics HE in patients with sepsis and identified its key neuroimaging patterns. The bilateral insular-cingulate pattern should be considered a potentially valuable neuroimaging marker enabling early verification of HE.

Keywords: sepsis; acute liver failure; hyperammonemia; hyperammonemic encephalopathy; MRI

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Talybov R.S., Trofimova T.N., Kleshchevnikova T.M., Fedorov N.M. Hyperammonemic encephalopathy associated with acute liver dysfunction in patients with sepsis: evaluation of neuroimaging features. *Medical Visualization*. 2026; 30 (3): 26–37. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1664>

Received: 13.06.2026.

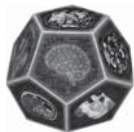
Accepted for publication: 27.07.2026.

Published online: 30.09.2026.

Введение

Сепсис представляет собой жизнеугрожающее состояние, в основе которого лежит дисрегуляция системного ответа макроорганизма на инфекционный агент, приводящая к развитию полиорганной недостаточности [1]. В глобальной структуре смертности сепсис занимает одну из лидирующих позиций [2]. У значительной части пациентов, перенесших сепсис, впоследствии формируются стойкие нарушения физического, психологического и когнитивного статуса, что обуславливает существенную нагрузку на систему здравоохранения [3–5]. Центральным патогенетическим звеном сепсиса является органная дисфункция, определяемая как частичная или полная утрата функциональной активности пораженного органа либо системы органов [4]. Спектр таких расстройств включает кардиоваскулярную, респираторную, гепатобилиарную, мочевыделительную и центральную нервную системы (ЦНС) [5].

Среди всех форм органной дисфункции при сепсисе доминирующее положение занимает острая дисфункция печени (ОДП), которая выявляется приблизительно у 46% пациентов. Летальность при данном осложнении может достигать 68%, что значительно превышает таковую при вовлечении других органов-мишеней [6, 7]. Печень является центральным метаболическим и иммунным органом, который в условиях сепсиса обеспечивает элиминацию бактерий, синтез цитокинов и острофазных белков. Однако избыточный воспалительный ответ способен индуцировать выраженный цитолиз гепатоцитов, приводящий к развитию сепсис-индуцированной острой дисфункции печени [6]. ОДП влечет за собой расстройство ферментативного цикла мочевины, следствием которого является гипераммониемия, представляющая собой ключевое патофизиологическое звено развития гипераммониемической энцефалопатии (ГЭ).



Клинические проявления ГЭ неспецифичны и варьируют от субклинических нарушений до комы и летального исхода [8]. Нейротоксическое воздействие аммиака на клетки головного мозга опосредуется рядом механизмов, в числе которых глутамин-индуцированный отек астроцитов, оксидативный стресс, нейровоспаление, нарушение нейромедиаторного гомеостаза и дисфункция митохондрий [9]. Верификация ГЭ в клинической практике в большинстве случаев осуществляется ретроспективно, особенно у коморбидных пациентов с сепсисом. Валидированные клиничко-лабораторные критерии отсутствуют, в связи с чем достоверная идентификация ГЭ на ранних стадиях патологического процесса крайне затруднена. Стойкая гипераммониемия способна индуцировать тяжелые церебральные повреждения и обуславливать отдаленные неврологические последствия [10]. Дополнительным фактором, лимитирующим раннюю диагностику, выступает необходимость проведения сложной дифференциальной диагностики с другими церебральными поражениями, что затрудняет своевременную верификацию ГЭ как основной причины неврологических нарушений.

Цель исследования: охарактеризовать МРТ-семиотику поражения головного мозга у пациентов с гипераммониемической энцефалопатией на фоне сепсиса и определить характерные нейровизуализационные паттерны.

Материал и методы

Настоящее проспективное исследование было одобрено локальным этическим комитетом ГБУЗ Тюменской области "Областная клиническая больница № 2" (протокол № 06/2025 от 03.10.2025). Информированное согласие было получено от всех пациентов, а при невозможности (тяжелое угнетение сознания, кома) – от их законных представителей до включения в исследование.

В исследование вошло 15 пациентов (10 мужчин, 5 женщин; средний возраст 42 ± 12 лет) с клинически верифицированными сепсисом и ГЭ, у которых в период с июня 2021 г. по февраль 2025 г. при нейровизуализации были обнаружены патологические сигнальные изменения в головном мозге (см. таблицу). Размер выборки обусловлен редкостью выявляемости сочетания сепсиса, ГЭ и характерных МРТ-изменений в клинической практике; все подходящие пациенты, госпитализированные в указанный период, были включены в анализ.

Диагноз ГЭ устанавливался при наличии следующих критериев: 1) подтвержденный сепсис (согласно критериям Sepsis-3); 2) уровень аммиака крови >100 мкмоль/л; 3) наличие печеночной дисфункции (АЛТ/АСТ $> 2 \times$ верхней границы нормы,

общий билирубин >20 мкмоль/л); 4) клинические признаки энцефалопатии (≥ 1 балла по шкале Вест-Хейвена); 5) исключение других причин поражения ЦНС (инсульт, менингит, токсическая энцефалопатия и др.) по данным анамнеза, лабораторных и инструментальных методов.

Для каждого пациента изучены истории болезни, содержавшие сведения о причинах ОДП, клинической манифестации, лабораторных показателях (уровни аммиака крови, печеночных трансаминаз, лактата, маркеров сепсиса) и объеме и характере проводимой терапии.

МРТ выполнялась всем пациентам в течение нескольких часов от момента дебюта неврологической симптоматики. Исследования проводились на томографе с напряженностью магнитного поля 1,5 Тл (Signa Voyager, General Electric). Протокол сканирования включал следующие последовательности: T2-взвешенные изображения (T2-ВИ) (TR/TE – 3000/80 мс, толщина среза – 5 мм, межсрезовый интервал – 1,5 мм, поле обзора – 220×220 мм); FLAIR (TR/TE – 11 000/125 мс, толщина среза – 5 мм, межсрезовый интервал – 1,5 мм, поле обзора – 220×220 мм); T1-взвешенные изображения (T1-ВИ) (TR/TE – 2000/10 мс, толщина среза – 5 мм, межсрезовый интервал – 1,5 мм, поле обзора – 220×220 мм); аксиальные двумерные градиент-эхоизображения SWAN (TR/TE – 453/14 мс, толщина среза – 5 мм, межсрезовый интервал – 1,5 мм, поле обзора – 220×220 мм), а также диффузионно-взвешенные изображения (ДВИ) с b-факторами 0 и 1000 с/мм², полученные в аксиальной плоскости с применением трех ортогональных направлений диффузионных градиентов и последующим построением изотропных карт (TR/TE – 4300/46 мс, толщина среза – 3 мм, межсрезовый интервал – 1 мм, поле обзора – 240×240 мм).

Анализ МРТ-данных проведен тремя опытными нейрорентгенологами с целью оценки следующих параметров: локализации и характеристик патологических очагов, интенсивности сигнала на T1-ВИ, T2-ВИ/FLAIR и SWAN-изображениях, особенностей ДВИ и измеряемого коэффициента диффузии (ИКД), наличия или отсутствия парамагнитных артефактов, а также обратимости сигнальных изменений при контрольных МРТ-исследованиях. Контрольные МРТ-исследования были выполнены всем исследуемым пациентам. Ввиду описательного характера исследования сравнение групп не проводилось (сплошная выборка).

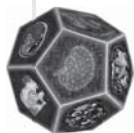
Результаты исследования

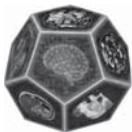
У всех 15 пациентов наблюдалась ОДП, развившаяся вследствие септического состояния. Сепсис был верифицирован в 100% случаев; его источни-

Таблица. Основные клинико-лабораторные показатели пациентов с гипераммониемической энцефалопатией и сепсисом**Table.** The key clinical and laboratory parameters of patients with hyperammonemic encephalopathy and sepsis

Возраст, годы	Пол	Источник сепсиса	Аммиак, мкмоль/л	АЛТ, Ед/л	АСТ, Ед/л	Общий билирубин, мкмоль/л	Лактат, ммоль/л	ПКТ, нг/мл	Паттерн поражения на МРТ	Исход
26	Муж	Урологический	120	350	220	36	3,8	10,5	Инсулярно-поясной паттерн	Регресс
30	Муж	Урологический	110	300	200	34	3,5	9,2	Инсулярно-поясной паттерн	Регресс
34	Муж	Урологический	125	400	250	38	4,0	12,0	Инсулярно-поясной паттерн	Регресс
38	Муж	Урологический	130	380	240	37	3,9	11,0	Инсулярно-поясной паттерн	Регресс
40	Муж	Урологический	127	450	280	42	4,2	13,5	Инсулярно-поясной паттерн	Регресс
41	Муж	Урологический	115	500	300	44	4,4	15,0	Инсулярно-поясной паттерн	Регресс
42	Муж	Хирургический	125	360	230	35	3,7	10,0	Инсулярно-поясной паттерн	Регресс
42	Муж	Хирургический	135	390	245	39	3,9	11,5	Инсулярно-поясной паттерн	Регресс
43	Муж	Хирургический	116	420	260	40	4,1	12,5	Инсулярно-поясной паттерн	Регресс
44	Муж	Хирургический	131	480	290	43	4,3	14,0	Инсулярно-поясной паттерн	Регресс
46	Жен	Хирургический	100	280	190	30	3,4	8,0	Инсулярно-поясной паттерн	Регресс
50	Жен	Хирургический	115	320	210	32	3,6	9,5	Паттерн поражения базальных ганглиев	Регресс
54	Жен	Хирургический	118	370	235	36	3,8	10,8	Инсулярно-поясной паттерн	Регресс
58	Жен	Криптогенный	105	290	195	28	3,4	7,5	Кортико-субкортикальный паттерн	Регресс
60	Жен	Криптогенный	125	340	215	34	3,7	9,0	Инсулярно-поясной паттерн	Регресс

Age, years	Sex	Source of sepsis	Ammonia, mmol/l	ALT, U/L	AST, U/L	Total bilirubin, μ mol/l	Lactate, mmol/l	PCT, ng/ml	Lesion pattern on MRI	Outcome
26	Male	Urological	120	350	220	36	3.8	10.5	Insular-cingulate pattern	Regression
30	Male	Urological	110	300	200	34	3.5	9.2	Insular-cingulate pattern	Regression
34	Male	Urological	125	400	250	38	4.0	12.0	Insular-cingulate pattern	Regression
38	Male	Urological	130	380	240	37	3.9	11.0	Insular-cingulate pattern	Regression
40	Male	Urological	127	450	280	42	4.2	13.5	Insular-cingulate pattern	Regression
41	Male	Urological	115	500	300	44	4.4	15.0	Insular-cingulate pattern	Regression
42	Male	Surgical	125	360	230	35	3.7	10.0	Insular-cingulate pattern	Regression
42	Male	Surgical	135	390	245	39	3.9	11.5	Insular-cingulate pattern	Regression
43	Male	Surgical	116	420	260	40	4.1	12.5	Insular-cingulate pattern	Regression
44	Male	Surgical	131	480	290	43	4.3	14.0	Insular-cingulate pattern	Regression
46	Female	Surgical	100	280	190	30	3.4	8.0	Insular-cingulate pattern	Regression
50	Female	Surgical	115	320	210	32	3.6	9.5	Basal ganglia lesion pattern	Regression
54	Female	Surgical	118	370	235	36	3.8	10.8	Insular-cingulate pattern	Regression
58	Female	Cryptogenic	105	290	195	28	3.4	7.5	Cortico-subcortical pattern	Regression
60	Female	Cryptogenic	125	340	215	34	3.7	9.0	Insular-cingulate pattern	Regression





ком послужила урологическая инфекция ($n = 6$), хирургическая инфекция ($n = 7$); в двух случаях источник сепсиса установить не удалось ($n = 2$). У всех пациентов диагностирована гипераммониемия. Данные биохимического анализа крови продемонстрировали выраженное повышение уровня аммиака (диапазон 90–145 мкмоль/л), лактата (диапазон 3,2–4,8 ммоль/л), печеночных трансаминаз (диапазон АЛТ 252–769 Ед/л, АСТ 175–436 Ед/л), общего билирубина (диапазон 28–44 мкмоль/л), прокальцитонина (диапазон 2,2–18,4 нг/мл) и С-реактивного белка (диапазон 190–286 мг/л). У 4 пациентов зарегистрирован метаболический ацидоз (диапазон pH 7,20–7,22). Концентрации электролитов сыворотки крови не имели существенных отклонений, что позволило исключить электролитные нарушения как причину энцефалопатии. У всех пациентов отмечалось снижение уровня сознания (оценка по шкале комы Глазго от 3 до 14 баллов), при этом судорожные приступы зарегистрированы у 4 (26,7%) пациентов. При проведении МРТ у 13 (86,7%) пациентов визуализировались симметричные поражения коры островковых долей и поясных извилин, характеризующиеся повышен-

ной интенсивностью сигнала на T2-ВИ и в режиме FLAIR, а также снижением сигнала на картах измеренного коэффициента диффузии (ИКД), что соответствовало цитотоксическому отеку (рис. 1).

У 1 (6,7%) пациента наблюдались симметричные поражения базальных ганглиев (рис. 2), у еще 1 (6,7%) пациента зарегистрированы асимметричные кортико-субкортикальные поражения в больших полушариях головного мозга (рис. 3).

При оценке ДВИ у всех 15 пациентов был выявлен цитотоксический отек, локализация которого соответствовала описанным выше зонам поражения. Признаки геморрагических изменений отсутствовали у всех пациентов. После коррекции терапии (назначение лактулозы и L-орнитин-L-аспартата) и проведения интенсивного гемодиализа у всех пациентов отмечены улучшение неврологической симптоматики, нормализация уровня трансаминаз и снижение концентрации аммиака в крови. Контрольное МРТ, выполненное всем пациентам после завершения лечения, зафиксировало признаки регресса всех выявленных патологических изменений в интервале от 10 до 14 дней (рис. 4–6).

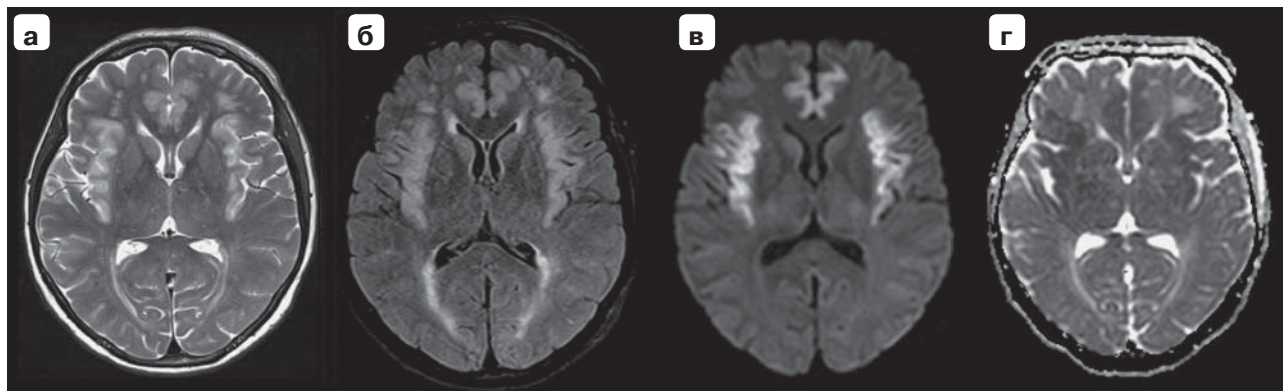


Рис. 1. МРТ головного мозга пациента 1 с гипераммониемической энцефалопатией и абдоминальным сепсисом. **а** – T2-ВИ; **б** – T2 flair; **в** – ДВИ; **г** – ИКД. Билатеральные симметричные зоны аномально гиперинтенсивного сигнала в инсулярной коре и поясной извилине с ограничением диффузии.

Fig. 1. Brain MRI of patient 1 with hyperammonemic encephalopathy and abdominal sepsis. **a** – T2-WI; **б** – T2-FLAIR; **в** – DWI; **г** – ADC. Bilateral symmetric areas of abnormal hyperintense signal in the insular cortex and cingulate gyrus with diffusion restriction.

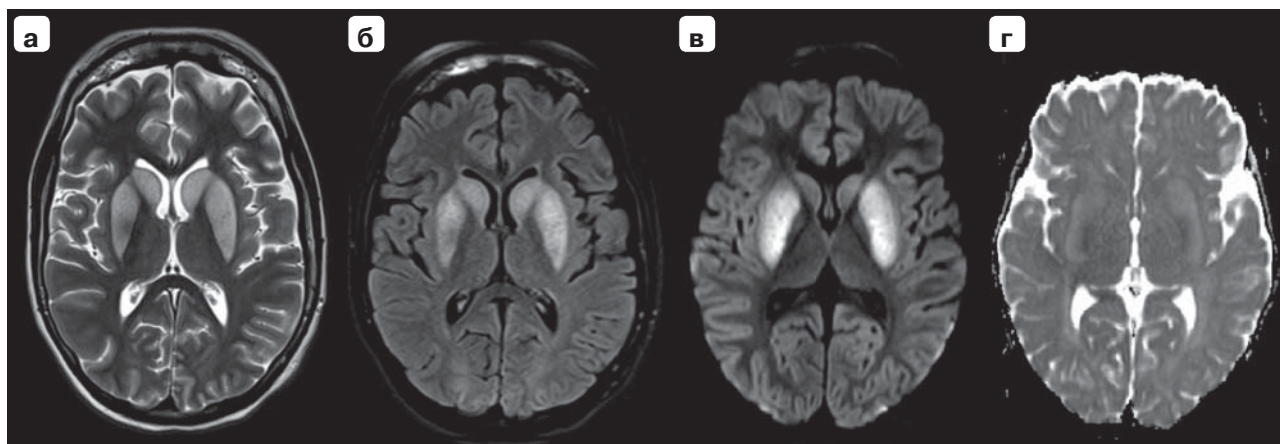
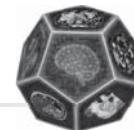


Рис. 2. МРТ головного мозга пациента 2 с гипераммониемической энцефалопатией и абдоминальным сепсисом. **а** – T2-ВИ; **б** – T2 flair; **в** – ДВИ; **г** – ИКД. Регистрируются симметричные билатеральные зоны поражения с вовлечением головки хвостатого ядра и скорлупы с умеренным ограничением диффузии.

Fig. 2. Brain MRI of patient 2 with hyperammonemic encephalopathy and abdominal sepsis: **a** – T2-WI; **б** – T2-FLAIR; **в** – DWI; **г** – ADC. Symmetric bilateral lesions involving the head of the caudate nucleus and putamen with moderate restricted diffusion are observed.

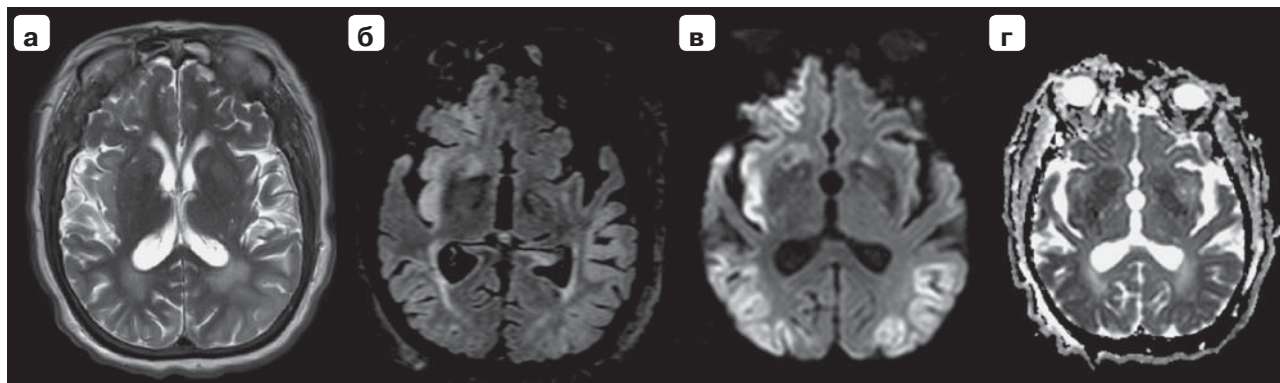


Рис. 3. МРТ головного мозга пациента 3 с гипераммониемической энцефалопатией и криптогенным сепсисом. **а** – T2-ВИ; **б** – T2 flair; **в** – ДВИ; **г** – ИКД. Визуализируется двустороннее, асимметричное поражение корковых структур височных и затылочных долей, а также островковой коры, характеризующееся ограничением диффузии.

Fig. 3. Brain MRI of patient 3 with hyperammonemic encephalopathy and cryptogenic sepsis. **a** – T2-WI; **б** – T2-FLAIR; **в** – DWI; **г** – ADC. Bilateral asymmetric involvement of cortical structures of the temporal and occipital lobes, as well as the insular cortex, characterized by restricted diffusion.

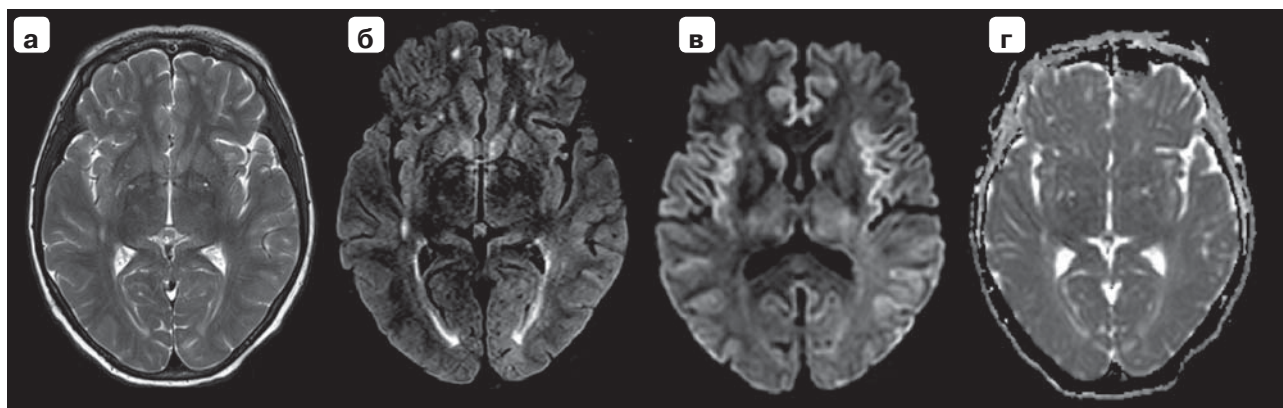
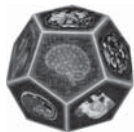


Рис. 4. Контрольная МРТ головного мозга пациента 1 через 10 дней после скорректированной терапии. **а** – T2-ВИ; **б** – T2 flair; **в** – DWI; **г** – ADC. Отмечается выраженный регресс цитотоксического отека в коре островковых долей и поясных извилин с остаточным невыраженным вазогенным отеком от коры.

Fig. 4. Follow-up brain MRI of patient 1 after 10 days adjusted therapy. **a** – T2-WI; **б** – T2-FLAIR; **в** – DWI; **г** – ADC. Marked regression of cytotoxic edema in the insular cortex and cingulate gyri is noted, with residual mild vasogenic edema of the cortex.

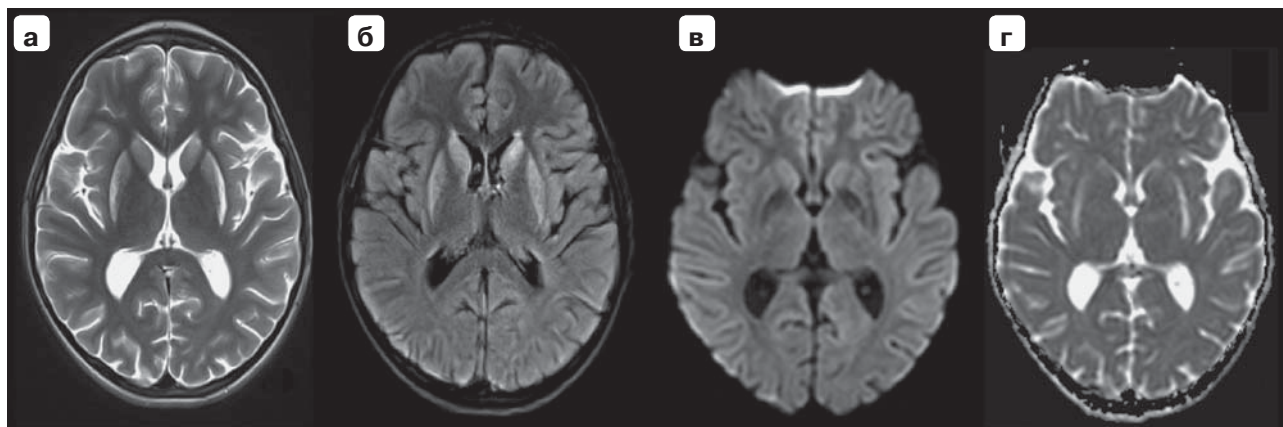


Рис. 5. Контрольная МРТ головного мозга пациента 2 через 12 дней после скорректированной терапии. **а** – T2-ВИ; **б** – T2 flair; **в** – DWI; **г** – ADC. Отмечается выраженный регресс цитотоксического отека в области базальных ядер с двух сторон.

Fig. 5. Follow-up brain MRI of patient 2 after 12 days adjusted therapy. **a** – T2-WI; **б** – T2-FLAIR; **в** – DWI; **г** – ADC. Marked regression of cytotoxic edema in the bilateral basal ganglia is noted.

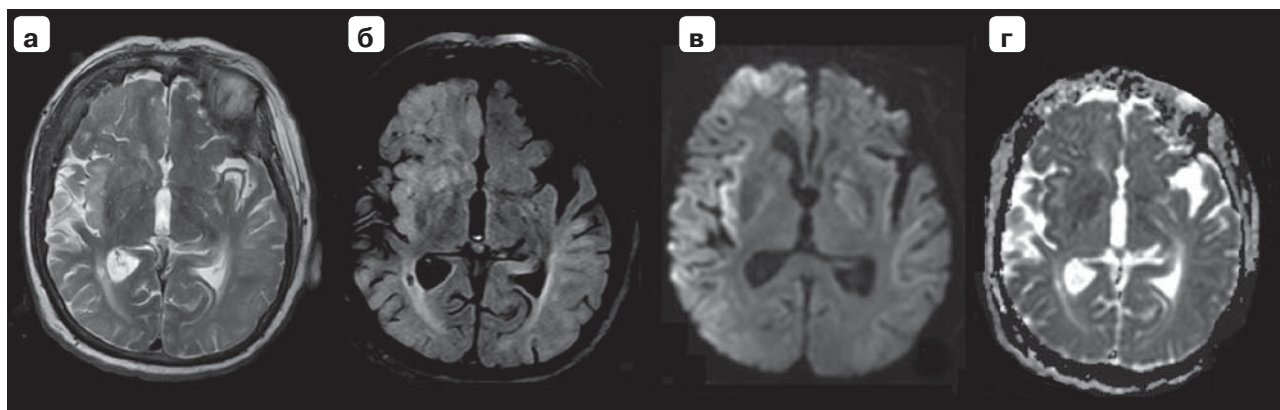
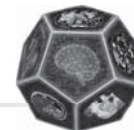


Рис. 6. Контрольная МРТ головного мозга пациента 3 через 14 дней после скорректированной терапии. **а** – T2-ВИ; **б** – T2 flair; **в** – DWI; **г** – ADC. Отмечается выраженный регресс явлений цитотоксического в корковых и субкортикальных отделах лобных, височных, островковых и затылочных долей.

Fig. 6. Follow-up brain MRI of patient 3 after 14 days adjusted therapy. **а** – T2-WI; **б** – T2-FLAIR; **в** – DWI; **г** – ADC. Marked regression of cytotoxic changes in the cortical and subcortical regions of the frontal, temporal, insular, and occipital lobes is noted.

Обсуждение

Несмотря на существенные достижения в области интенсивной терапии, сепсис сохраняет статус одной из приоритетных проблем мирового здравоохранения, что обусловлено высокими показателями летальности и частотой развития полиорганной недостаточности [11, 12]. Патогенетически данное состояние характеризуется сложным многоступенчатым каскадом иммунологических событий, включающих гипервоспалительный ответ, коагулопатию с развитием ДВС-синдрома, а также выраженную нестабильность гемодинамики [13]. В клинической практике сепсис способен инициировать широкий спектр повреждений печени – от гипоксического гепатита и септического холестаза до вторичного склерозирующего холангита [14]. Желтуха, повышение активности трансаминаз и удлинение протромбинового времени служат внешними маркерами глубоких патогенетических сдвигов, в основе которых лежит цепь системных воспалительных событий, приводящих к повреждению гепатоцитов. Патогенез сепсис-индуцированного поражения печени многокомпонентен и включает в себя неконтролируемое воспаление, многоступенчатые провоспалительные реакции, окислительный стресс, пироптоз и нарушение аутофагии [15]. Среди этих факторов окислительный стресс выступает в роли ключевого медиатора, усугубляющего патофизиологические процессы как посредством прямого цитолитического действия на гепатоциты, так и вследствие истощения эндогенной антиоксидантной защиты [16]. Закономерным следствием тяжелой печеночной дисфункции в условиях сепсиса явля-

ется нарушение детоксицирующей функции органа. Печень играет центральную роль в метаболизме аммиака, трансформируя его в мочевины в перипортальных гепатоцитах. При сепсис-индуцированном поражении печени элиминация аммиака критически снижается, что приводит к гипераммониемии (рис. 7) [17]. В условиях повышенной концентрации аммиака в крови возрастает его проникновение через гематоэнцефалический барьер путем диффузии неионизированной формы (NH_3) и активного транспорта ионизированной (NH_4^+).

Это инициирует последовательную череду метаболических нарушений в ЦНС, где ведущая роль в детоксикации переходит к астроцитам. Глутаминсинтетаза астроцитов катализирует превращение избытка аммиака и глутамата в глутамин. Согласно общепринятой осмотической гипотезе, накопление глутамина как осмотически активного вещества вызывает приток воды в астроциты, их набухание и развитие цитотоксического отека головного мозга [18]. Помимо этого, дисбаланс нейротрансмиссии, возникающий вследствие снижения регуляции глутаматных рецепторов на фоне избыточного внесинаптического накопления глутамата и усиления ГАМК-ергического торможения, вносит вклад в клинические проявления энцефалопатии. Данный каскад молекулярных событий находит прямое отражение в результатах МРТ, которая является ценнейшим инструментом для понимания патофизиологии ГЭ *in vivo*. В отличие от хронической печеночной недостаточности, для которой характерно отложение парамагнитного марганца в базальных ганглиях, ОДП, ассоциированная с гипераммоние-

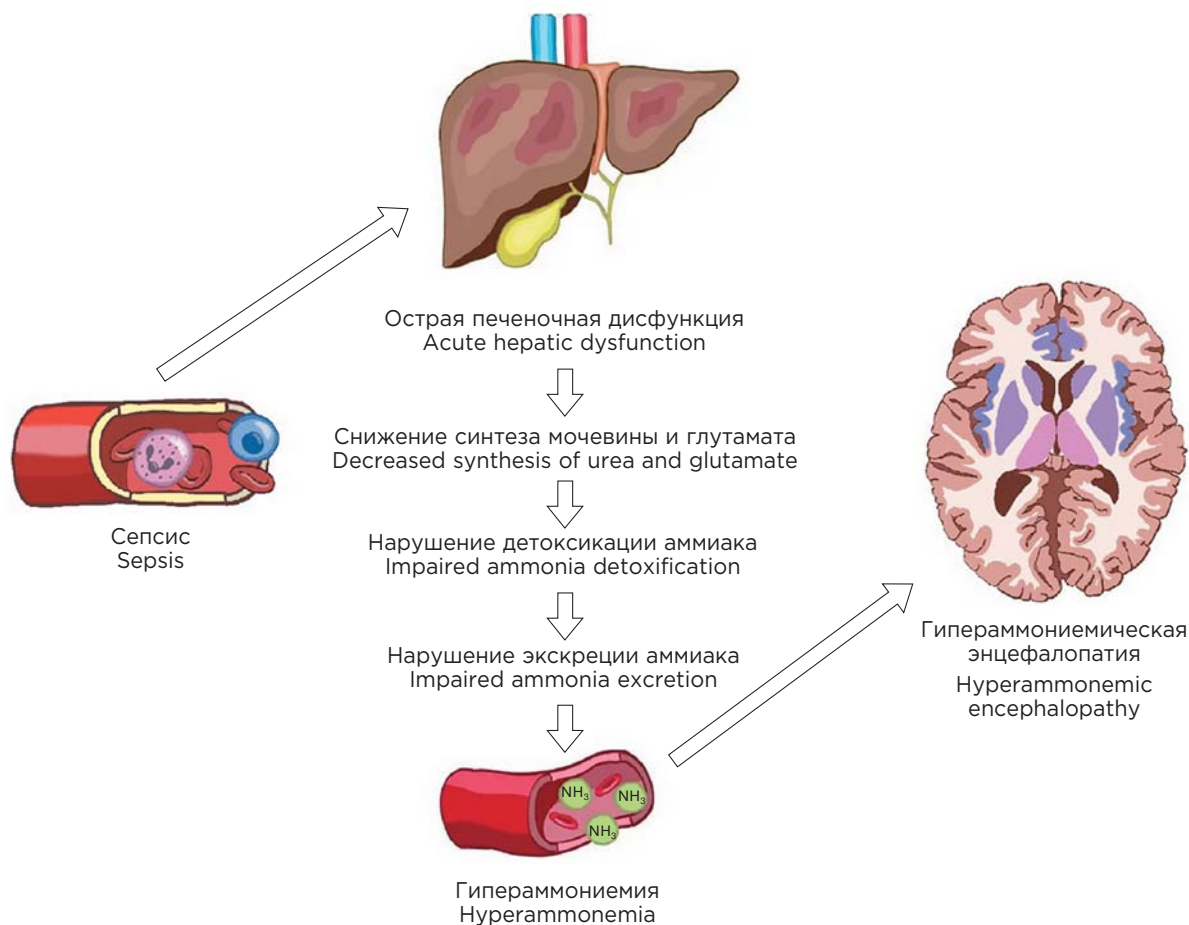
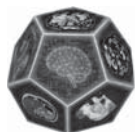


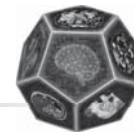
Рис. 7. Патогенетические механизмы развития гипераммониемической энцефалопатии при сепсисе (рисунок Р.С. Талыбова).

Fig. 7. Pathogenetic mechanisms of hyperammonemic encephalopathy in sepsis (picture by R.S. Talybov).

мией, сопровождается избирательным кортикальным поражением поясной извилины и островка [19]. Представленные в настоящем исследовании результаты демонстрируют, что комбинация сепсиса и острого поражения печени предопределяет высокий риск развития ГЭ. Данный факт полностью подтверждает концепцию синергического повреждающего воздействия системного воспаления и гипераммониемии на ткань головного мозга.

В представленном исследовании у 15 пациентов с сепсис-индуцированной ОДП и ГЭ наиболее частым МРТ-паттерном (86,7%) было симметричное поражение коры островковых долей и поясных извилин с признаками цитотоксического отека. Таким образом, особое значение в диагностике ГЭ принадлежит методам нейровизуализации, среди которых МРТ обладает наивысшей чувствительностью при оценке характера и распространенности поражения. Избирательная уязвимость поясной извили-

ны и островковой коры к аммиаку определяется не наличием специфических “аммониевых рецепторов”, а нейрометаболической организацией этих структур [20]. Ключевыми факторами являются высокая интенсивность глутаматергической нейротрансмиссии, выраженная зависимость от метаболизма астроцитов и значительные энергетические потребности их нейронных сетей. Эти области представляют собой высокоинтегративные кортикальные зоны, обрабатывающие интероцептивную, эмоциональную и когнитивную информацию [21]. Они характеризуются высокой плотностью возбуждающих глутаматергических связей и интенсивной синаптической активностью даже в состоянии покоя, что делает их критически зависимыми от эффективного астроцитарного контроля внеклеточного глутамата [21]. Более того, высокая интенсивность энергетического метаболизма и зависимость от митохондриального окислительного фос-

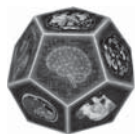


форилирования делают эти сети чрезвычайно чувствительными к ингибированию митохондриальных ферментов, вызванному аммиаком, подавлению цикла Кребса и увеличению образования активных форм кислорода, что в совокупности приводит к быстрому дефициту энергии [22]. Интерпретация нейровизуализационной картины требует тщательной дифференциальной диагностики, так как обширные кортикальные изменения сигнала могут наблюдаться при гипоксически-ишемической энцефалопатии, лимбическом энцефалите, острой гипертензивной и гипонатриемической энцефалопатиях, синдроме задней обратимой энцефалопатии, алкогольной и наркотической интоксикации, отравлении угарным газом или фосфорорганическими соединениями, а также болезни Крейтцфельдта-Якоба [23]. Ключевыми дифференциально-диагностическими критериями выступают: наличие документированного сепсиса, сочетание двух обязательных клинических компонентов (ОДП и гипераммониемии), а также характерные признаки при визуализации, а именно билатеральное поражение инсулярной коры и поясной извилины, а также специфический тип отека. Принципиальной клинической особенностью ГЭ, подтвержденной в нашем исследовании, является ее потенциальная обратимость при условии своевременной агрессивной коррекции гипераммониемии. Проведение интенсивного гемодиализа обеспечило не только нормализацию уровня аммиака крови, билирубина и трансаминаз, но и выраженный регресс неврологической симптоматики с убедительной положительной динамикой при контрольных МРТ-исследованиях. Данный факт однозначно подтверждает ключевую роль нейтрализации нейротоксических соединений в патогенетической терапии ГЭ и строго обосновывает необходимость раннего начала экстракорпоральной детоксикации у пациентов с сепсисом, осложненным острым поражением печени и энцефалопатией. Результаты настоящего исследования дополнительно демонстрируют, что положительная динамика (в виде регресса неврологической симптоматики и МРТ-изменений) ожидается в интервале от 10 до 14 дней от начала комплексной терапии, что может служить прогностическим критерием благоприятного исхода. Следует признать наличие существенных ограничений настоящего исследования, включающих небольшой объем выборки и отсутствие контрольной группы. Кроме того, объективные трудности связаны как с выполнением МРТ у пациентов в критическом состоянии, так и с последующей интерпретацией полученных данных. Тяжесть общего статуса, необходимость непрерыв-

ного мониторинга жизненных функций, а также значительная продолжительность сканирования ограничивают широкое применение данного нейровизуализационного метода в клинической практике. Дополнительным препятствием служит отсутствие в доступной литературе количественных показателей чувствительности и специфичности инсулярно-поясного паттерна применительно к ГЭ; объемы выборки, как правило, ограничиваются единичными клиническими случаями. На сегодняшний день наша выборка, по доступным нам данным, является одной из самых больших описанных в литературе, что повышает достоверность описанных МРТ-паттернов. Преодоление указанных пробелов требует проведения многоцентровых проспективных исследований с включением динамических МРТ-исследований, ориентированных на оценку обратимости выявленных изменений. Оптимизация существующих МРТ-протоколов с целью сокращения времени сканирования, а также разработка четких критериев отбора пациентов с сепсисом для проведения нейровизуализации остаются актуальными и неотложными научно-практическими задачами. Реализация предложенных подходов позволит своевременно верифицировать ГЭ, минимизировать диагностические ошибки и, как следствие, достоверно снизить показатели летальности и частоту неврологических осложнений в данной когорте пациентов.

Закключение

Проведенное исследование позволило охарактеризовать МРТ-семиотику ГЭ у пациентов с сепсисом и определить ее ключевые нейровизуализационные паттерны. Ключевыми предикторами улучшения прогноза выступают раннее выявление сепсис-индуцированной печеночной дисфункции, а также своевременное и адекватное проведение этиотропной и патогенетической терапии сепсиса. Билатеральный инсулярно-поясной паттерн поражения следует рассматривать в качестве потенциального ценного нейровизуализационного маркера, позволяющего осуществлять раннюю верификацию ГЭ. Наряду с указанным признаком для ГЭ у пациентов с сепсисом может регистрироваться изолированное поражение базальных ядер или кортико-субкортикальных структур. Применение мультидисциплинарной стратегии, включающей детальный сбор анамнеза, комплексное лабораторное обследование и своевременную нейровизуализацию, позволяет не только обосновать патогенез поражения ЦНС, но и своевременно скорректировать лечебную тактику у данной категории пациентов.



Участие авторов

Талыбов Р.С. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, проведение исследования, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста, ответственность за целостность всех частей статьи, подготовка, создание опубликованной работы.

Трофимова Т.Н. – концепция и дизайн исследования, подготовка, создание опубликованной работы, утверждение окончательного варианта статьи.

Клещевникова Т.М. – проведение исследования, статистическая обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста.

Федорова Н.М. – сбор и обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста.

Authors' participation

Talybov R.S. – concept and design of the study, collection and analysis of data, conducting research, analysis and interpretation of the obtained data, writing text, responsibility for the integrity of all parts of the article, preparation and creation of the published work.

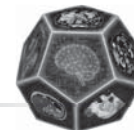
Trofimova T.N. – concept and design of the study, preparation and creation of the published work, approval of the final version of the article.

Kleshchevnikova T.M. – conducting research, statistical analysis, analysis and interpretation of the obtained data, writing text.

Fedorov N.M. – participation in scientific design, text preparation and editing.

Список литературы [References]

1. Гусев Е.Ю., Зотова Н.В., Черешнев В.А. "Сепсис-3": новая редакция – старые проблемы. Анализ с позиции общей патологии. *Инфекция и иммунитет*. 2021; 11 (4): 649–662. <https://doi.org/10.15789/2220-7619-SAN-1629>
Gusev E.Yu., Zotova N.V., Chereshevnev V.A. Sepsis-3: new edition – old problems. analysis from the perspective of general pathology. *Russian Journal of Infection and Immunity = Infektsiya i Immunitet*. 2021; 11 (4): 649–662. <https://doi.org/10.15789/2220-7619-SAN-1629> (In Russian)
2. Qin C., Ma D., Pang L. et al. Prognostic factors of sepsis: a systematic review and meta-analysis. *BMC Infect. Dis.* 2025; 25 (1): 1670. <https://doi.org/10.1186/s12879-025-12094-9>
3. Manrique-Caballero C.L., Del Rio-Pertuz G., Gomez H. Sepsis-Associated Acute Kidney Injury. *Crit. Care Clin.* 2021; 37 (2): 279–301. <https://doi.org/10.1016/j.ccc.2020.11.010>
4. Pais T., Jorge S., Lopes J.A. Acute Kidney Injury in Sepsis. *Int. J. Mol. Sci.* 2024; 25 (11): 5924. <https://doi.org/10.3390/ijms25115924>
5. Zarbock A., Nadim M.K., Pickkers P. et al. Sepsis-associated acute kidney injury: consensus report of the 28th Acute Disease Quality Initiative workgroup. *Nat. Rev. Nephrol.* 2023; 19 (6): 401–417. <https://doi.org/10.1038/s41581-023-00683-3>
6. Xu X., Yang T., An J. et al. Liver injury in sepsis: manifestations, mechanisms and emerging therapeutic strategies. *Front. Immunol.* 2025; 16: 1575554. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1575554>
7. Guo Y., Guo W., Chen H. et al. Mechanisms of sepsis-induced acute liver injury: a comprehensive review. *Front. Cell. Infect. Microbiol.* 2025; 15: 1504223. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2025.1504223>
8. Meier C, Burns K, Manolikos C, Fatovich D, Bell DA. Hyperammonaemia: review of the pathophysiology, aetiology and investigation. *Pathology*. 2024; 56 (6): 763–772. <https://doi.org/10.1016/j.pathol.2024.06.002>
9. Zhao L., Hou S., Na R. et al. Prognostic role of serum ammonia in patients with sepsis-associated encephalopathy without hepatic failure. *Front. Public Health.* 2022; 10: 1016931. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1016931.1016931>
10. Denk C.H., Kunzmann J., Maieron A. et al. Histopathological examination of characteristic brain MRI findings in acute hyperammonemic encephalopathy: A case report and review of the literature. *Neuroradiol. J.* 2024; 37 (5): 630–635. <https://doi.org/10.1177/19714009231212370>
11. Гоманова Л.И., Бражников А.Ю. Сепсис в XXI веке: этиология, факторы риска, эпидемиологические особенности, осложнения, профилактика. *Эпидемиология и вакцинопрофилактика*. 2021; 20 (3): 107–117. <https://doi.org/10.31631/2073-3046-2021-20-3-107-117>
Gomanova L.I., Brazhnikov A.Y. Sepsis in the XXI Century: Etiology, Risk Factors, Epidemiological Features, Complications, Prevention. *Epidemiology and Vaccinal Prevention*. 2021; 20 (3): 107–117. <https://doi.org/10.31631/2073-3046-2021-20-3-107-117> (In Russian)
12. Мальков П.Г., Франк Г.А.. Сепсис – краткий обзор основных понятий. *Общая реаниматология*. 2025; 21 (3): 51–56. <https://doi.org/10.15360/1813-9779-2025-3-2566>
Malkov P.G., Frank G.A. Sepsis: A Brief Overview of the Key Concepts. *General Reanimatology*. 2025; 21 (3): 51–56. <https://doi.org/10.15360/1813-9779-2025-3-2566>
13. Srdić T., Đurašević S., Lakić I. et al. From Molecular Mechanisms to Clinical Therapy: Understanding Sepsis-Induced Multiple Organ Dysfunction. *Int. J. Mol. Sci.* 2024; 25 (14): 7770. <https://doi.org/10.3390/ijms25147770>
14. Lu Y., Shi Y., Wu Q. et al. An overview of drug delivery nanosystems for sepsis-related liver injury treatment. *Int. J. Nanomedicine*. 2023; 18: 765–779. <https://doi.org/10.2147/IJN.S394802>
15. Chen J.W., Liu C.Y., Li S. et al. Sepsis-associated liver injury: Mechanisms and potential therapeutic targets. *Wld J. Gastroenterol.* 2024; 30 (42): 4518–4522. <https://doi.org/10.3748/wjg.v30.i42.4518>
16. Xu X., Yang T., An J. et al. Liver injury in sepsis: Manifestations, mechanisms and emerging therapeutic strategies. *Front. Immunol.* 2025; 16: 1575554. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1575554>
17. Zhao L., Hou S., Na R. et al. Prognostic role of serum ammonia in patients with sepsis-associated enceph-



- alopathy without hepatic failure. *Front. Public Health*. 2022;10. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1016931>. 1016931
18. Wang P., Yan J., Shi Q. et al. Relationship between Nonhepatic Serum Ammonia Levels and Sepsis-Associated Encephalopathy: A Retrospective Cohort Study. *Emerg. Med. Int.* 2023; 2023: 6676033. <https://doi.org/10.1155/2023/6676033>
 19. Kerbert A.J.C., Engelmann C., Habtesion A. et al. Hyperammonemia induces programmed liver cell death. *Sci. Adv.* 2025; 11 (10): eado1648. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ado1648>
 20. Denk C.H., Kunzmann J., Maieron A. et al. Histopathological examination of characteristic brain MRI findings in acute hyperammonemic encephalopathy: A case report and review of the literature. *Neuroradiol. J.* 2024; 37 (5): 630–635. <https://doi.org/10.1177/19714009231212370>
 21. Simone L., Caruana F., Borra E., et al. Anatomic-functional organization of insular networks: From sensory integration to behavioral control. *Progress Neurobiol.* 2025; 247: 102748. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2025.102748>
 22. Bakharji A., Alarfaj H., Omar S. et al. Brain magnetic resonance imaging findings in hyperammonemic hepatic encephalopathy: A case series and literature review. *Biomed. Rep.* 2025; 22 (6): 98. <https://doi.org/10.3892/br.2025.1976>
 23. Wakrim S., El Mekkaoui A., Benlenda O. et al. Brain MR imaging in acute hyperammonemic: Case report. *Radiol. Case Rep.* 2022; 17 (10): 4046–4048. <https://doi.org/10.1016/j.radcr.2022.07.060>

Для корреспонденции*: Талыбов Рустам Сабирович – e-mail: rustam230789@gmail.com

Талыбов Рустам Сабирович – канд. мед. наук, заместитель главного врача по развитию науки и инновациям ГБУЗ Тюменской области “Областная клиническая больница №2”; ассистент кафедры онкологии, радиологии и радиотерапии ФГБОУ ВО “Тюменский государственный медицинский университет” Минздрава России, Тюмень. <https://orcid.org/0000-0003-3820-2057>

Трофимова Татьяна Николаевна – член-корр. РАН, доктор мед. наук, профессор, профессор кафедры рентгенологии и радиологии ФГБОУ ВО “Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова” Минздрава России, Санкт-Петербург. <https://orcid.org/0000-0003-4871-2341>

Клещевникова Татьяна Михайловна – канд. мед. наук, директор ГБУЗ Тюменской области “Областная клиническая больница №2”, Тюмень. <https://orcid.org/0000-0001-6893-7973>

Федоров Николай Михайлович – канд. мед. наук, доцент, доцент кафедры онкологии, радиологии и радиотерапии ФГБОУ ВО “Тюменский государственный медицинский университет” Минздрава России, Тюмень. <https://orcid.org/0000-0003-1833-1687>

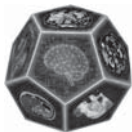
Contact*: Rustam S. Talybov – e-mail: rustam230789@gmail.com

Rustam S. Talybov – Cand. of Sci. (Med.), Head Deputy Chief Physician for Science and Innovation Development, Tyumen Regional Clinical Hospital №2; assistant of the Department of Oncology, radiology and radiation therapy, Tyumen State Medical University, Tyumen, Russia. <https://orcid.org/0000-0003-3820-2057>

Tatyana N. Trofimova – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doct. of Sci. (Med.), Professor, professor of Department of Radiology, First Pavlov State Medical University of St. Petersburg, St. Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0000-0003-4871-2341>

Tatyana M. Kleshchevnikova – Cand. of Sci. (Med.), Director of Tyumen Regional Clinical Hospital №2, Tyumen. <https://orcid.org/0000-0001-6893-7973>

Nikolai M. Fedorov – Can. of Sci. (Med.), associate professor of the Department of Oncology, radiology and radiation therapy, Tyumen State Medical University, Tyumen, Russia. <https://orcid.org/0000-0003-1833-1687>



Состояние фиброзной покрышки атеросклеротической бляшки сонных артерий: возможности ультразвуковой диагностики и значение для стратификации риска ишемического инсульта

© Тимина И.Е.^{1*}, Балахонова Т.В.², Чететкин А.О.³, Шульгина Л.Э.⁴

¹ ФГБУ "Национальный медицинский исследовательский центр хирургии им. А.В. Вишневского" Минздрава России; 117997 Москва, ул. Большая Серпуховская, д. 27, Российская Федерация

² ФГБУ "Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии имени академика Е.И. Чазова" Минздрава России; 121552 г. Москва, ул. Академика Чазова, д.15а, Российская Федерация

³ ФГБНУ "Российский центр неврологии и нейронаук"; 125367 Москва, Волоколамское шоссе, д. 80, Российская Федерация

⁴ ФГБУ "Поликлиника №1" Управления делами Президента Российской Федерации; 119002 Москва, пер. Сивцев Вражек, д. 26/28, Российская Федерация

Цель исследования: систематизировать ультразвуковые признаки различных состояний фиброзной покрышки (ФП) атеросклеротической бляшки сонных артерий, определяющие риск развития ишемического инсульта, на основании анализа морфологических изменений ее поверхности, происходящих при трансформации бляшки в нестабильную.

В статье обобщены литературные данные и собственный опыт авторов. ФП отделяет липидно-некротическое ядро бляшки от просвета сосуда и наиболее уязвима к повреждению. Ее истончение, разрыв и изъязвление отражают разные состояния дестабилизации бляшки и положены в основу новой классификации риска инсульта Carotid Plaque-RADS. Описаны морфологические особенности каждого состояния, обсуждены пороговые значения толщины ФП и приведены ультразвуковые критерии толстой и тонкой покрышки, ее разрыва и зажившего изъязвления.

Заключение. В рутинной практике при ультразвуковом исследовании толщину ФП оценивают качественно по принципу "видно/не видно" без количественного измерения. Ультразвуковое исследование выявляет с высокой точностью разрыв покрышки, а изъязвление с умеренной. Точность диагностики повышают контрастное усиление, трехмерная реконструкция и картирование низких скоростей кровотока. Оценка состояния ФП бляшки в комплексе с определением ее структуры и степени стеноза целесообразна для улучшения стратификации риска и персонализации лечения пациентов.

Ключевые слова: сонные артерии; атеросклеротическая бляшка; фиброзная покрышка; изъязвление; разрыв; ишемический инсульт; ультразвуковое исследование

Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Тимина И.Е., Балахонова Т.В., Чететкин А.О., Шульгина Л.Э. Состояние фиброзной покрышки атеросклеротической бляшки сонных артерий: возможности ультразвуковой диагностики и значение для стратификации риска ишемического инсульта. *Медицинская визуализация*. 2026; 30 (3): 38–49. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1666>

Поступила в редакцию: 17.06.2026.

Принята к печати: 03.09.2026.

Опубликована online: 29.09.2026.

Fibrous cap state in carotid atherosclerotic plaque: Ultrasound diagnostic capabilities and implication for ischemic stroke risk stratification

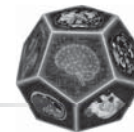
© Irina E. Timina^{1*}, Tatyana V. Balakhonova², Andrey O. Chechetkin³, Ludmila E. Shulgina⁴

¹ A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 27, Bol'shaya Serpukhovskaya str., Moscow 117997, Russian Federation

² National medical research centre of cardiology named after academician E.I. Chazov of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 15a, Academician Chazov str., Moscow 121552, Russian Federation

³ Russian Center of Neurology and Neurosciences; 80, Volokolamskoye shosse, Moscow 125367, Russian Federation

⁴ Polyclinic №1 of the office of the President of the Russian Federation; 26/28, Sivtsev Vrazhek per., Moscow 119002, Russian Federation



Objective. To systematize the ultrasound features of various fibrous cap (FC) states of carotid atherosclerotic plaques that determine the risk of ischemic stroke, based on an analysis of the morphological changes in its surface that occur during plaque destabilization.

This manuscript summarizes data both from literature and the authors' own experience. The FC separates the lipid-necrotic plaque core from the vessel lumen and is the most vulnerable to damage structure. Its thinning, rupture, and ulceration reflect different states of plaque destabilization and underlie the new Carotid Plaque-RADS stroke risk classification. The morphological features of each state are described, the threshold values for FC thickness are discussed. Ultrasound criteria for thick and thin plaque caps, plaque rupture, and healed ulceration are presented.

Conclusion. In routine practice, FC thickness on ultrasound is assessed qualitatively using the "seen/not seen" basis without quantitative measurement. Ultrasound detects cap ruptures with high accuracy and ulcerations with moderate accuracy. Contrast enhancement, three-dimensional reconstruction, and low-velocity blood flow mapping could improve diagnostic accuracy. Assessing the plaque's FC status together with plaque structure and degree of stenosis is advisable for improving risk stratification and personalizing patient treatment.

Keywords: carotid arteries; atherosclerotic plaque; fibrous cap; ulceration; rupture; ischemic stroke; ultrasound examination

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Timina I.E., Balakhonova T.V., Chechetkin A.O., Shulgina L.E. Fibrous cap state in carotid atherosclerotic plaque: Ultrasound diagnostic capabilities and implication for ischemic stroke risk stratification. *Medical Visualization*. 2026; 30 (3): 38–49. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1666>

Received: 17.06.2026.

Accepted for publication: 03.09.2026.

Published online: 29.09.2026.

В общей структуре острых нарушений мозгового кровообращения значительно преобладает ишемический инсульт, составляя 65,3% [1]. Атеротромботический подтип составляет 20–25% всех острых ишемических нарушений мозговых кровообращений (транзиторных ишемических атак и инсультов), причем в подавляющем большинстве случаев развивается вследствие атеросклеротического стеноза/окклюзии сонных артерий [2]. Накопленные за последние два десятилетия данные убедительно демонстрируют, что не все гемодинамически значимые бляшки приводят к инсульту, и, напротив, нередко инфаркт мозга развивается при стенозах менее 50% [3, 4]. Это свидетельствует о важной роли морфологических характеристик бляшки, таких как ее состав и состояние поверхности.

Возможность стратификации риска ишемического инсульта у пациентов с каротидным атеросклерозом на основании новой классификации Carotid Plaque-RADS (Reporting and Data System), опубликованной в 2024 г. и построенной по морфологическим критериям трансформации бляшки из стабильной в нестабильную, вызывает растущий интерес не только у специалистов лучевой и ультразвуковой диагностики, но и широкого круга клиницистов – неврологов, кардиологов и ангиохирургов. Ультразвуковое исследование (УЗИ) является первым и самым распространенным методом диагностики каротидного атеросклероза, часто его результаты в выявлении нестабильных бляшек могут иметь решающее значение в судьбе пациента. Анализ литературных источников показал необходимость систематизации данных о возможностях и ограничениях УЗИ в определении основных признаков нестабильности каротидных бляшек.

Гистоморфологические признаки склонных к разрыву “нестабильных” или “уязвимых” атеросклеротических бляшек (АСБ) сонных артерий включают тонкую фиброзную покрывку (ФП), крупное липидно-некротическое ядро (>40% объема бляшки), усиленную неоваскуляризацию, активное воспаление, положительное ремоделирование, кровоизлияние в бляшку [5, 6]. Одним из ключевых звеньев дестабилизации АСБ является состояние ее ФП. Истончение и разрыв покрывки приводят к контакту тромбогенного ядра бляшки с кровотоком, запуская каскад артерио-артериальной эмболии.

Большое внимание состоянию ФП уделяется в новой классификации стратификации риска инсульта Carotid Plaque-RADS, согласно которой выделяют 4 ее типа, отражающих по мере нарастания нестабильность бляшки и риск развития ишемического инсульта: толстая (RADS 3a), тонкая (RADS 3b), изъязвление (RADS 3c) и разрыв (RADS 4b) [7]. В связи с этим возрастает роль методов диагностики и технологий, позволяющих детально и точно оценить состояние ФП, что поможет существенно улучшить оценку риска инсульта и способствовать оптимальному лечению заболевания. УЗИ является, как правило, первым методом диагностики, выявляющим атеросклеротическое поражение сонных артерий. Несмотря на большое количество публикаций, посвященных ультразвуковой оценке структурных особенностей АСБ, работ, детально исследующих состояние ФП, немного и их данные порой противоречивы.

Цель исследования: систематизировать ультразвуковые признаки различных состояний фиброзной покрывки атеросклеротической бляшки сонных артерий, определяющих риск развития ишеми-



ческого инсульта, на основании анализа морфологических изменений ее поверхности, происходящих при трансформации бляшки в нестабильную.

Формирование пула анализируемых источников литературы, описывающих результаты морфологических и ультразвуковых исследований ФП симптомных и бессимптомных бляшек сонных артерий, осуществлялось методом всестороннего целенаправленного поиска в зарубежных и отечественных базах данных (PubMed, MEDLINE, EMBASE, РИНЦ) и ручного экспертного реферирования всеми авторами статьи. Поисковая стратегия в базах данных проводилась за 25-летний период (2000–2025 гг.) и строилась на комбинации следующих русскоязычных и аналогичных им англоязычных ключевых терминов: “атеросклеротическая бляшка сонной артерии/atherosclerotic carotid plaque”, “стеноз сонной артерии/carotid artery stenosis”, “фиброзная покрышка/fibrous cap”, “изъязвленная бляшка/plaque ulceration”, “разрыв бляшка/plaque rupture”, “ультразвук/ultrasound”, “ультразвуковое исследование/ultrasonography”, “контрастное ультразвуковое исследование/contrast-enhanced ultrasound”, “гистология/histology”, “морфология/morphology”, “каротидная эндартерэктомия/carotid endarterectomy”. Для обеспечения фундаментальной патоморфологической глубины исследования к полученным источникам были дополнительно добавлены 3 классические работы (1994, 1996 и 1997 гг.). Данные публикации признаны международным научным сообществом основополагающими (“золотым стандартом”) в вопросах микроскопических механизмов дестабилизации ФП, а их данные остаются неизменными и по сей день. Искусственное расширение временных рамок автоматизированного поиска до 1990 г. было признано нецелесообразным во избежание избыточного “зашумления” выборки устаревшими техническими статьями по возможностям ультразвуковых сканеров 90-х годов. Включение каждой публикации в финальную выборку утверждалось коллегиально на основании научной ценности и обоснованности представленных морфоультразвуковых сопоставлений. Такой анализ и многоэтапное обсуждение каждой статьи позволили минимизировать субъективное смещение выборки.

Фиброзная покрышка – это структура, отделяющая липидное ядро бляшки от просвета сосуда. ФП является наиболее уязвимой структурой бляшки, при дестабилизации которой происходит ее истончение, образуются трещины и/или разрывы. Покрышка неосложненной АСБ состоит из клеток эндотелия, элементов соединительной ткани, гладкомышечных клеток, Т-лимфоцитов, пенистых клеток (макрофагов). Гладкомышечные клетки преоб-

ладают в покрышке стабильной бляшки, мигрируют из меди в интиму, продуцируют внеклеточный матрикс (коллаген, эластин) [8]. На стадии развития нестабильной (уязвимой) бляшки активированные макрофаги секретируют деструктивные металлопротеиназы, расщепляющие коллаген и эластин ФП бляшки и усугубляющие деструктивные процессы в ядре бляшки. В нестабильных бляшках наблюдается апоптоз гладкомышечных клеток, что приводит к истончению покрышки [8].

Разрыв происходит тогда, когда ФП, покрывающая липидно-некротическое ядро, становится слишком тонкой, чтобы выдержать силу пульсирующего кровотока. Разрыв может быть большим, приводящим к выбросу материала некротического ядра в кровоток, или небольшим, иногда называемым трещиной. В обоих случаях обнажение материалов ядра и коллагенов может активировать тромбоциты и систему свертывания крови и привести к тромбозу (рис. 1) [9].

Важным вопросом является критическая толщина ФП бляшки, склонной к разрыву. Для коронарных артерий, где “золотым стандартом” считаются данные аутопсий, критической толщиной покрышки считается величина <65 мкм [5, 10]. Однако для сонных артерий критическая толщина покрышки иная. Это связано с особенностями гемодинамики (высокий сдвиговый стресс) и морфологией бляшки. Одной из первых работ, в которой приведены данные о толщине покрышки бляшки в сонных артериях, является статья R. Virmani и соавт. [11]. Толщина ФП каротидных бляшек при ее разрыве была почти в три раза больше, чем при разрыве ФП бляшки в коронарных артериях (72 ± 15 мкм против 23 ± 17 мкм соответственно). В уязвимых бляшках сонных артерий, имеющих липидно-некротическое ядро с тонкой покрышкой и инфильтрацией макрофагами, средняя толщина ФП составляла 72 ± 24 мкм, тогда как верхняя граница для аналогичной по структуре АСБ в коронарных артериях составила 65 мкм или менее.

В работе J.N. Redgrave и соавт. [12] проведены данные морфологического исследования 428 каротидных бляшек, удаленных у симптомных пациентов в ходе каротидной эндартерэктомии. Оптимальным пороговым значением толщины ФП, отличающим бляшки с разрывом, было <200 мкм. Для бляшек без разрыва средняя толщина покрышки составляла 500 (от 300 до 700) мкм при медиане минимальной величины 250 мкм. Схожие данные были получены в работе японских авторов, которые изучили 24 бляшки, удаленные в ходе каротидной эндартерэктомии у 18 симптомных и 6 бессимптомных пациентов. Минимальная толщина бляшек ($n = 5$) с истонченной, но не поврежденной ФП при морфологиче-

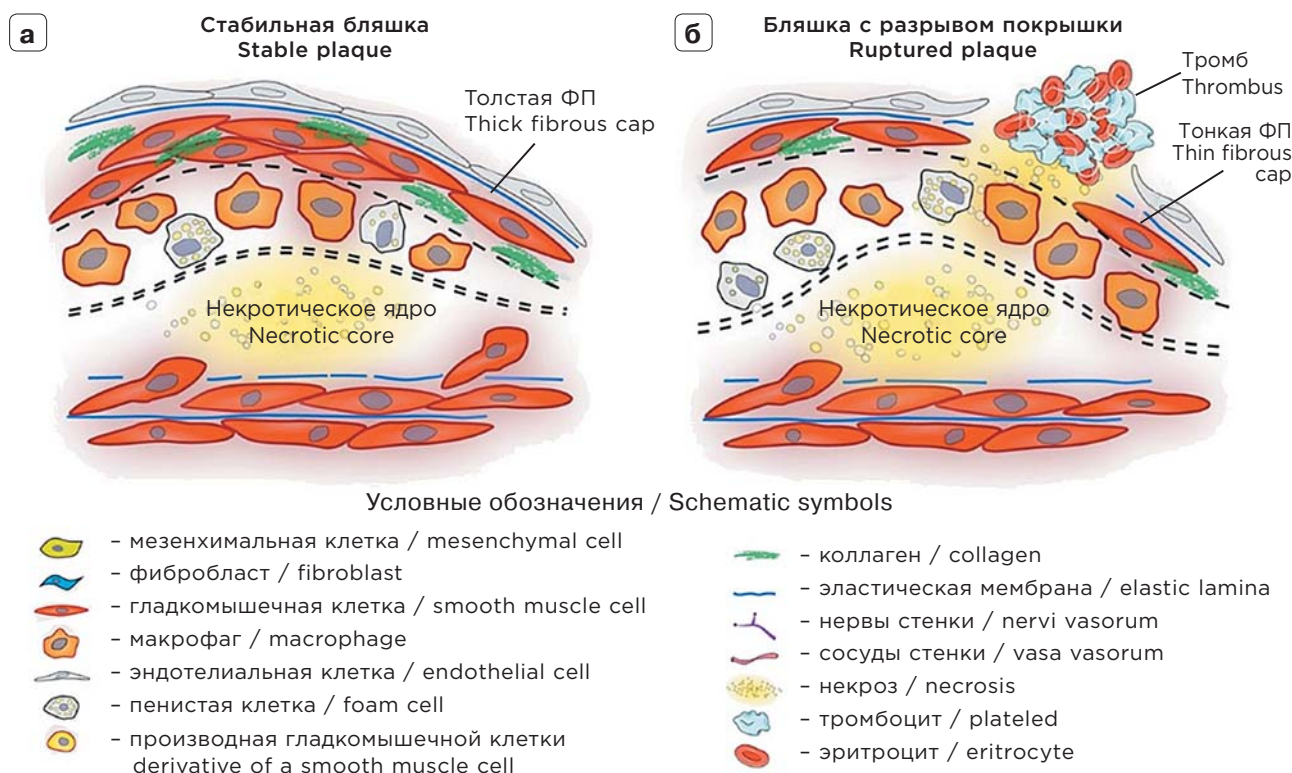
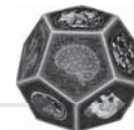


Рис. 1. Стабильная атеросклеротическая бляшка и бляшка с разрывом фиброзной покрывки (модифицированная и адаптированная на русский язык схема из статьи Alonso-Herranz L. и соавт., 2023 [9]). **а** – стабильная бляшка с толстой, богатой коллагеном ФП над некротическим ядром; **б** – бляшка с тонкой ФП, ее разрывом и образованием тромба в зоне разрыва. Границы ФП выделены двойными и одинарной пунктирными линиями: первая отделяет пространство между эндотелием и некротическим ядром, вторая отделяет субэндотелиальные гладкомышечные клетки.

Fig. 1. Stable atherosclerotic plaque and plaque with a ruptured fibrous cap (modified and adapted into Russian from the diagram by Alonso-Herranz L. et al., 2023 [9]). **a** – stable plaque with a thick, collagen-rich fibrous cap (FC) over a necrotic core; **b** – plaque with a thin FC, its rupture, and thrombus formation in the rupture zone. The FC boundaries are marked by double and single dotted lines: the first separates the space between the endothelium and the necrotic core, the second separates the subendothelial smooth muscle cells.

ском исследовании составила 177 (50–339) мкм. В бляшках без разрыва ($n = 3$) наблюдалась толстая ФП (минимальная толщина 301 (279–325) мкм) [13]. Среди более современных исследований следует отметить работу S. Shindo и соавт. [14], которые оценили бляшки в сонных артериях с высокой степенью стеноза и разрывом покрывки, измерив ее толщину по данным оптической когерентной томографии. Оптическая когерентная томография обеспечивает точное измерение толщины ФП, поскольку типичное изображение при данном методе имеет осевое разрешение 10 мкм, что примерно в 10 раз выше, чем у любого другого доступного метода диагностической визуализации, в том числе внутрисосудистого УЗИ. Толщина покрывки была оценена в самой тонкой части как для бляшек без повреждения ФП, так и для бляшек с разрывом покрывки (из 36 исследованных бляшек 24 были с разрывом).

Средняя толщина самой тонкой ФП составляла 80 мкм, при этом 95% бляшек с разрывом имели толщину ФП < 130 мкм, что, по мнению авторов, являлось пороговым значением разрыва покрывки бляшки в сонных артериях.

Сводные данные по величине истонченной ФП, обобщенные в таблице, свидетельствуют об отсутствии на сегодняшний день валидированного порогового значения. В связи с этим представленные в работах значения не могут рассматриваться в качестве единого диагностического критерия.

В ультразвуковой диагностике долгое время привычными в описании характеристики поверхности АСБ были такие критерии, как гладкая, неровная или изъязвленная [15]. Оценка неповрежденной ФП (тонкая или толстая) до последнего времени практически никогда не проводилась в связи с отсутствием достоверных количественных критериев,

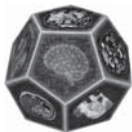


Таблица. Толщина фиброзной покрывки (ФП) бляшки сонных артерий при ее истончении и разрыве

Table. Thickness of the fibrous cap (FC) of carotid artery plaques during thinning and rupture

Автор, год, ссылка Author, year, link	Количество бляшек Number of plaques	Симптомные бляшки Symptomatic plaques, n (%)	Бляшки с разрывом ФП Plaques with a rupture of the FC, n (%)	Величина ФП при ее истончении и разрыве (среднее значение/медиана/пороговое значение), мкм The magnitude of the FC during its thinning and rupture (average value / median / threshold value), μm	Метод определения Method of determination
Virmani R., 2006 [11]	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data	72 ± 15	Морфология Morphology
Watanabe A., 2012 [13]	24	18 (75%)	16 (67%)	177 (50–339)	Морфология Morphology
Redgrave J., 2008 [12]	428	428 (100%)	257 (60%)	<200	Морфология Morphology
Shindo S., 2014 [14]	36	16 (44%)	24 (67%)	<130	Оптическая когерентная томография Optical coherence tomography

на которые можно было бы опираться. Несмотря на быстрое развитие и постоянное совершенствование ультразвуковых технологий, возрастающее пространственное разрешение современных ультразвуковых сканеров, на сегодняшний день в клинической рутинной практике количественно измерить толщину ФП бляшки без применения специализированных программ обработки ультразвукового изображения не представляется возможным, поэтому мы можем оценить толщину покрывки

бляшки лишь качественно, на основании критерия “видно/не видно” (рис. 2).

В приведенной работе А. Watanabe и соавт. [13] была выявлена положительная зависимость ($r = 0,74$) между толщиной ФП по данным морфологического исследования (максимальная толщина ФП 571 (93–1062) мкм) и результатами УЗИ с применением трехмерной реконструкции и навигацией (максимальная толщина ФП 439 (242–809) мкм). Истонченная ФП (5 бляшек) и ее отсутствие при

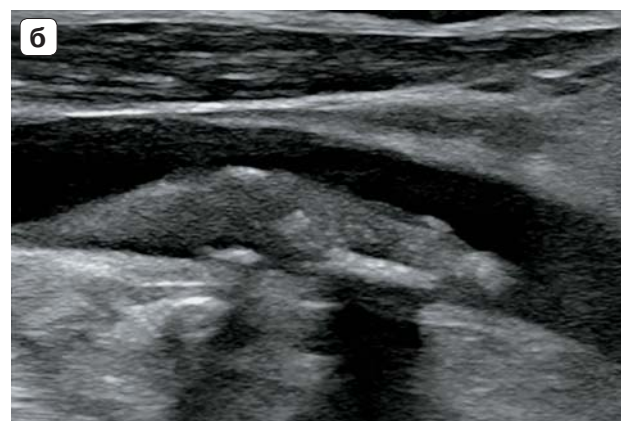
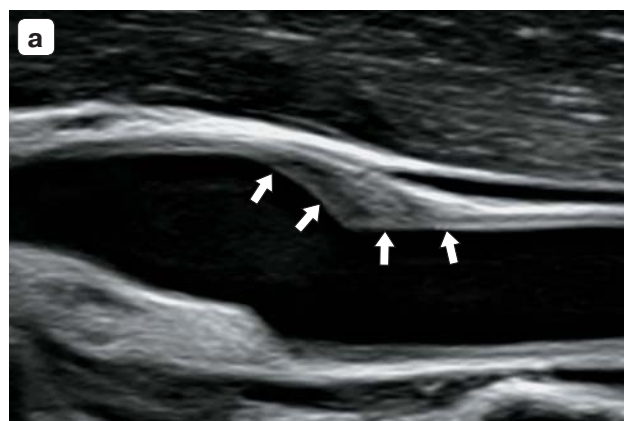
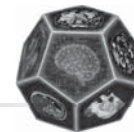


Рис. 2. ФП атеросклеротической бляшки каротидного синуса. **а** – бляшка с толстой покрывкой: гиперэхогенная линейная структура по контуру бляшки со стороны просвета указана стрелками. **б** – бляшка с тонкой покрывкой: гиперэхогенная покрывка не визуализируется.

Fig. 2. FC of an atherosclerotic plaque in the carotid sinus. **a** – plaque with a thick cap: the hyperechoic linear structure along the plaque's contour on the luminal side is indicated by arrows. **b** – plaque with a thin cap: the hyperechoic cap is not visualized.



разрыве (16 бляшек) коррелировали с отсутствием видимой покрышки в этом месте при УЗИ. Авторами сделан вывод, что исчезновение видимой ФП при УЗИ является значимым признаком нестабильности АСБ.

На основании данных литературных источников и классификации Carotid Plaque-RADS следует считать, что толстая ФП на ультразвуковом изображении – это отчетливо дифференцируемая линейная гиперэхогенная структура, покрывающая бляшку со стороны просвета сосуда и видимая на всем протяжении бляшки во всех плоскостях сканирования. Тонкая ФП четко не визуализируется при УЗИ. Наш опыт показывает, что толщина ФП часто неоднородна на разных участках бляшки, поэтому для правильной оценки ФП следует провести исследования в продольном и поперечном сечениях во всех доступных плоскостях сканирования. Если ФП не визуализируется на всем протяжении АСБ или на каком-то участке, то с большой долей вероятности можно считать ее истонченной (рис. 3). При проведении УЗИ предлагаем следующие варианты заключения, оценивающие толщину ФП: “фиброзная покрышка визуализируется на всем протяжении бляшки” для толстой ФП, “фиброзная покрышка достоверно не визуализируется” для тонкой ФП, “фиброзная покрышка визуализируется фрагментарно” для ФП неравномерной толщины, “оценка фиброзной покрышки неинформативна/ограничена техническими факторами” для кальцинированных или плохо визуализируемых бляшек.

Для точного визуального определения границ бляшки целесообразно использовать режимы цветового картирования или режимы недоплеровской визуализации кровотока (например, B-flow). Визуализация покрышки бляшки и точность исследования зависят от класса прибора, на котором проводится исследование, частоты датчика, корректных настроек B-режима, плоскости сканирования и структурных особенностей бляшки. По данным метаанализа 2025 г. точность УЗИ в диагностике неповрежденной ФП средняя: чувствительность метода составляет 73%, специфичность – 50% и диагностическая точность – 64%, уступая магнитно-резонансной томографии по аналогичным показателям 92, 84 и 88% соответственно [16].

Разрыв ФП морфологически соответствует стадии острого воспаления в бляшке. Этот тип состояния покрышки бляшки несет высокий риск развития ишемического инсульта и опасен тем, что выход компонентов липидно-некротического ядра, обладающих высоким тромбогенным потенциалом, провоцирует быстрое формирование красного тромба на поверхности бляшки с эмболизацией фрагментами тромба артерий мозга.

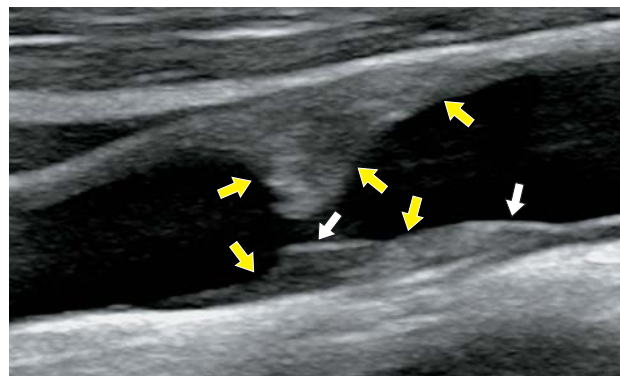


Рис. 3. Атеросклеротическая бляшка каротидного синуса с фрагментарно определяемой ФП. Стрелки белого цвета указывают на толстую покрышку, стрелки желтого цвета – на отсутствие видимой покрышки.

Fig. 3. Atherosclerotic plaque in the carotid sinus with a fragmentarily visualized fibrous cap. White arrows indicate a thick cap, yellow arrows indicate no visible cap.

Причины разрыва покрышки можно разделить на внутренние и внешние. Среди внутренних факторов следует выделить большое липидно-некротическое ядро, в котором могут присутствовать признаки недавнего кровоизлияния, истончение ФП и активное воспаление. Разрыв всегда происходит там, где покрышка наиболее тонкая и инфильтрирована макрофагами и пенстыми клетками [17]. Истончение ФП, вероятно, связано с постепенной потерей гладкомышечных клеток и снижением ими синтеза коллагена. Так, гладкомышечные клетки отсутствуют в месте разрыва, что ограничивает способность бляшки восстанавливать покрышку [17, 18]. В бляшках с разрывом покрышки часто встречается повышенная неоваскуляризация вследствие воспаления в зоне адвентиции. Внешними факторами разрыва покрышки могут быть эмоциональный и физический стресс, активация симпатической нервной системы, приводящая к повышению артериального давления и частоты сердечных сокращений [19].

Приведенные морфологические характеристики бляшки с разрывом ФП позволили нам выделить ее основные ультразвуковые признаки [20], к которым относятся:

- линейный дефект покрышки (поверхности) АСБ с наличием острых краев;
- локальное углубление, стенки которого сформированы структурами бляшки с отсутствием гиперэхогенного контура. Размеры углубления, как правило, небольшие относительно объема бляшки;
- в структуре бляшки часто присутствуют гипоэхогенные участки, расположенные в разных частях (как признаки нестабильности бляшки);

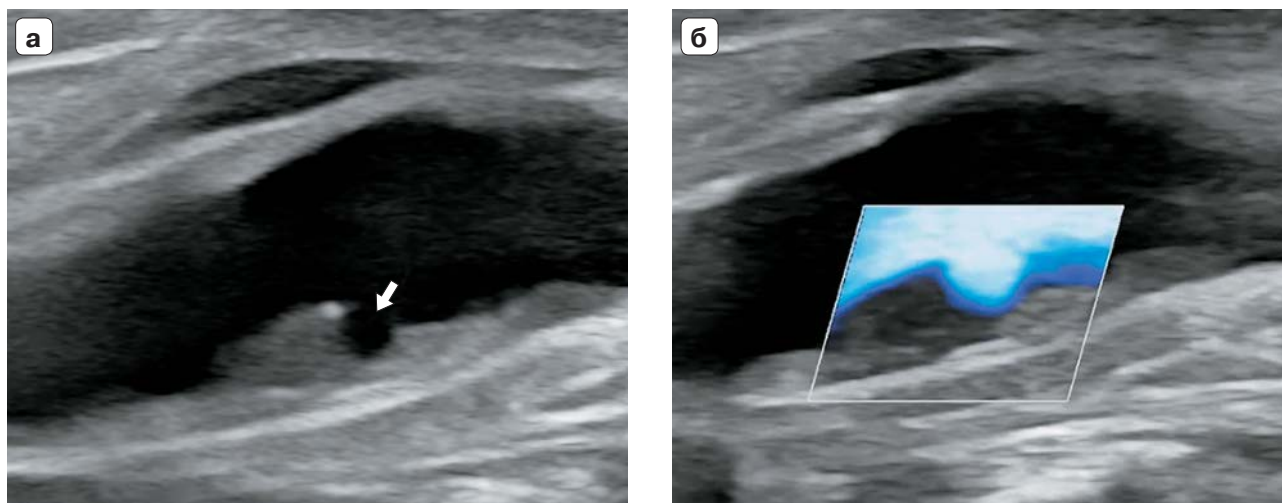
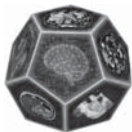


Рис. 4. Атеросклеротическая бляшка каротидного синуса с разрывом ФП. **а** – в В-режиме определяется дефект поверхности бляшки (указан стрелкой) с острыми краями и анэхогенной полостью без гиперэхогенного контура; **б** – анэхогенная полость, полностью окрашиваемая в режиме картирования низкоскоростных кровотоков.

Fig. 4. Atherosclerotic plaque in the carotid sinus with a ruptured fibrous cap. **a** – B-mode imaging reveals a plaque surface defect (indicated by the arrow) with sharp edges and an anechoic cavity without a hyperechoic outline; **b** – the anechoic cavity is completely filled with color in low-velocity flow mapping mode.

- образовавшаяся под разрывом покрывки полость в режимах цветowego картирования кровотока окрашивается полностью;

- в одной АСБ может определяться несколько дефектов ФП (рис. 4).

Данные метаанализа показали, что чувствительность УЗИ в выявлении разрыва ФП высока и составляет 91% (79–97%), специфичность – 80% (68–88%) и общая точность – 85% (77–91%) [16].

Представляют интерес механизмы дальнейшей трансформации, происходящие с покрывкой бляшки в области разрыва. ФП, как динамической структуры с эндотелиальными механизмами восстановления, способной заживать после разрыва, в результате чего формируется новая ФП, выстилающая изъязвленный участок. Полное и эффективное заживление может сформировать новую прочную ФП [21].

В работе Z. Teng и соавт. [22] пациентам с транзиторной ишемической атакой проводили высоко-разрешающую магнитно-резонансную томографию сонных артерий в течение 72 ч после острого ишемического цереброваскулярного события. Исследование повторяли через 3 и 12 мес у 26 пациентов с разрывом ФП на исходных снимках. Исследователями фиксировались за период наблюдения повторные цереброваскулярные события. Заживление разрыва покрывки бляшки наблюдалось у большинства пациентов (88%; у 23 из 26), причем у пациентов с заживлением ФП не было рецидивов ишемических симптомов в течение одного года наблюдения. У 3 пациентов с диагности-

рованными рецидивами цереброваскулярных событий заживление разрыва ФП не происходило. Авторы предположили, что бляшка становится более уязвимой, если заживление происходит недостаточно.

В отличие от разрыва покрывки бляшки, изъязвление можно определить как процесс хронического воспаления, который развивается в ряде случаев в результате предшествующего выхода атероматозного материала и последующего заживления разрыва ФП бляшки. В патогенезе изъязвления АСБ, помимо хронического воспаления, роль отводится биомеханическому стрессу и дистрофическим изменениям в структуре покрывки.

Определение “изъязвление” и его размеры в литературе варьируют в зависимости как от используемого метода диагностики, так и понимания его разными исследовательскими группами. С точки зрения гистологии термин “изъязвление” описывается как эндотелиальный дефект шириной и глубиной не менее 1000 мкм [23]. У специалистов лучевой и ультразвуковой диагностики термин “изъязвление” бляшки применяется к углублениям поверхности размером не менее 1 или 2 мм согласно различным исследованиям и предлагаемым системам стратификации риска [24–27]. Такие дефекты характеризуются наличием шейки и основания, имеют разные размеры и, следовательно, различные формы [28].

J.de Bray и соавт. в 1997 г. [29] предложили критерии, которые долгое время были наиболее широ-

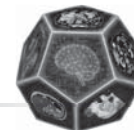


Рис. 5. Атеросклеротическая бляшка каротидного синуса с изъязвлением (зажившим). **а** – визуализируется бляшка с большим изъязвленным участком (глубиной 3 мм и шириной 8 мм), дно которого имеет гиперэхогенный контур (указан стрелкой); **б** – изъязвленный участок полностью окрашивается в режиме цветового доплеровского картирования.

Fig. 5. Atherosclerotic plaque in the carotid sinus with ulceration (healed). **a** – the plaque is visualized with a large ulcerated area (3 mm deep and 8 mm wide), the base of which has a hyperechoic contour (indicated by the arrow); **b** – the ulcerated area is completely filled with color in color Doppler mapping mode.

ко используются при УЗИ, согласно которым изъязвленный (или кратерообразный) дефект АСБ должен быть не менее 2 мм в длину и глубину, иметь четко очерченную заднюю стенку у основания в В-режиме и демонстрировать внутреннее обратное течение крови в режиме цветового доплеровского картирования. Согласно сегодняшним представлениям, признак четко очерченной задней стенки кратерообразного углубления АСБ в В-режиме можно трактовать как рубцевание дефекта после вымывания липидного ядра.

Применение современных ультразвуковых технологий, в том числе контрастного усиления, позволяет считать язвенным дефектом углубление не менее чем 1 x 1 мм [26]. При построении трехмерных ультразвуковых изображений в диагностике изъязвления используется критерий объема полости не менее 1 мм³ [30].

По нашему мнению, бляшки с зажившим изъязвлением при УЗИ чаще характеризуются следующими признаками [20]:

- кратерообразным углублением на поверхности глубиной и шириной не менее 1 мм;
- четкими, утолщенными, преимущественно гиперэхогенными краями углубления на поверхности АСБ;
- гетерогенными стенками, преимущественно повышенной эхогенности, нередко с включениями кальция;
- к зажившему изъязвлению крайне редко прилежат структуры пониженной эхогенности;
- в режимах цветового картирования кровотока углубление окрашивается полностью (рис. 5).

Исследования показали, что изъязвленные дефекты бляшки чаще формируются проксимальнее места максимального стеноза (до 70% случаев), что объясняется более высоким напряжением сдвига по сравнению с частью бляшки, расположенной дистальнее точки максимального стеноза [23, 28].

Паттерн “вихревого движения” крови в кратере изъязвления, наблюдаемый при УЗИ с контрастом, когда микропузырьки имеют дезорганизованное движение внутри язвенной полости, в сочетании с более часто наблюдаемым тромбозом на изъязвленных бляшках объясняет возникновение артерио-артериальной эмболии [31]. Описано различие в частоте обнаружения язвенных дефектов между бессимптомными и симптомными бляшками: в 14 и 36% случаев соответственно [31].

Диагностическая точность УЗИ в выявлении изъязвления в бляшках в сонных артериях умеренная. Согласно данным метаанализа 2025 г., чувствительность УЗИ в выявлении изъязвленных бляшек составляет 78% (68–86%), специфичность 75% (65–83%) и общая точность 77% (69–83%) [16]. Ограничения в основном обусловлены принципом нативной визуализации. При традиционном двумерном УЗИ ошибки в выявлении изъязвления могут возникнуть, если датчик не параллелен оси сосуда или ориентации язвенного дефекта. Точность УЗИ в выявлении изъязвления может снижаться с увеличением степени стеноза [32]. Кроме того, наличие кальцификации, дающей акустическую тень, может скрывать участок изъязвления бляшки [33]. Низкая точность УЗИ в диагностике изъязвлений АСБ сонных артерий может быть обусловлена и тем, что

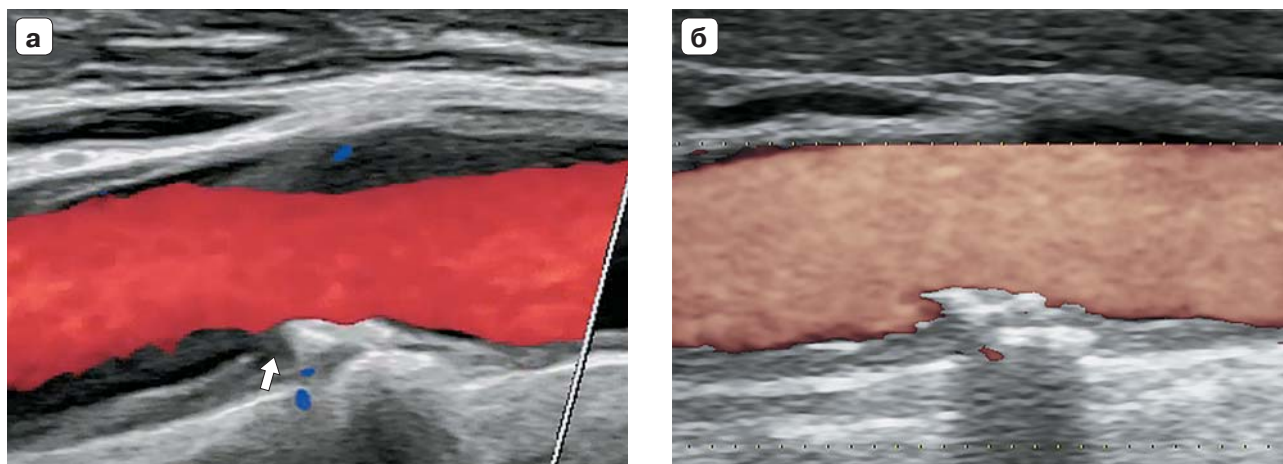


Рис. 6. Изъязвленная атеросклеротическая бляшка. **а** – в режиме цветового доплеровского картирования полость изъязвленного участка (указана стрелкой) не окрашивается; **б** – в режиме низких скоростей кровотока полость полностью окрашивается.

Fig. 6. Ulcerated atherosclerotic plaque. **a** – in color Doppler imaging mode, the cavity of the ulcerated area (indicated by the arrow) is not filled with color; **b** – in low-velocity flow mode, the cavity is completely filled with color.

критерии диагностики достаточно субъективны и могут различаться между исследователями и между центрами.

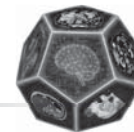
Повысить точность УЗИ в выявлении изъязвления можно при использовании эхоконтрастных препаратов или при построении трехмерных реконструкций изображения [34]. Сравнение контраст-усиленного УЗИ и стандартного дуплексного сканирования сонных артерий показало, что исследование с контрастом обладает большей чувствительностью (88% против 29% соответственно) и диагностической точностью (87% против 57% соответственно) в выявлении язвенных дефектов АСБ [26]. В рамках того же исследования УЗИ с контрастом выявило больше изъязвленных бляшек, чем компьютерно-томографическая ангиография, что объясняется более высоким пространственным и временным разрешением ультразвукового метода. Развитие ультразвуковых технологий, в частности появление возможности картирования низкоскоростных потоков, позволяет неинвазивно выявлять участки изъязвления бляшки (рис. 6). Однако их диагностическая эффективность по сравнению с контраст-усиленным УЗИ требует дальнейшего изучения.

Следует отметить, что до последнего времени в рутинной клинической ультразвуковой практике при описании исследования врачи не делали различий между разрывом покрышки и зажившим изъязвлением бляшки, чаще всего описывая дефект поверхности как изъязвленный или кратерообразный при большом его размере. Ввиду разной степени риска инсульта (согласно новой классификации Carotid Plaque-RADS), которая может влиять на так-

тику лечения пациента, целесообразно разграничивать эти два состояния ФП и указывать это в протоколе заключения.

Изъязвленные бляшки, так же как и бляшки с разрывом покрышки, могут претерпевать трансформацию в результате заживления язвенного дефекта. В целом остается неизвестным, сколько времени занимает заживание язвенного дефекта. Интересные данные приведены в исследовании М. Simonetto и соавт. [35], которые в 2020 г. опубликовали результаты последовательных ультразвуковых исследований 3215 пациентов, 2622 из которых прошли повторные УЗИ сонных артерий. Язвенным дефектом бляшки сонных артерий считали углубление поверхности бляшки не менее 2 мм с хорошо очерченной задней стенкой. Распространенность изъязвленных бляшек при первом УЗИ составила 3% (82/3215). Среднее время наблюдения составило 42 ± 30 мес, а медиана последующих исследований – 6. Среди 82 пациентов с изъязвленными АСБ контрольные исследования были проведены у 65 (79%) человек. В течение периода наблюдения язвенный дефект бляшки зажил примерно у половины больных ($n = 28$; 43%) при среднем времени до заживления 23 ± 21 мес. Из всех 2622 последующих исследований у 45 (1,7%) пациентов обнаружили новый изъязвленный дефект бляшки, среднее время выявления которого составило 36 ± 28 мес. Остались недостаточно изученными факторы, связанные с заживлением и развитием язвенных дефектов бляшки.

Имеются и более пессимистичные данные относительно заживления изъязвлений. Так, U. Schminke



и соавт. [36] проводили мониторинг с помощью трехмерного УЗИ 17 изъязвленных бляшек у 16 пациентов в течение среднего периода наблюдения $17,6 \pm 6,3$ мес. В подавляющем большинстве случаев (76,5%; $n = 13$) язвенные дефекты бляшек остались без изменений, в 17,6% случаев ($n = 3$) наблюдался полный или частичный регресс, а в 5,9% ($n = 1$) выявлено прогрессирование дефекта.

Следует отметить, что диагностика именно зажившего изъязвления только на основании формы дефекта, экзогенности его краев и других признаков при одномоментном УЗИ может представлять определенные трудности. Такие признаки могут свидетельствовать о хронических или репаративных изменениях, однако без морфологического подтверждения или динамического наблюдения не позволяют с высокой степенью достоверности определить давность дефекта.

Ограничения

В обсуждении мы использовали представляющие нам самыми информативными как современные, так и фундаментальные публикации, однако число исследований, сопоставляющих морфологические и ультразвуковые феномены, ограничено. В большинстве опубликованных исследований не было четко указано какие дифференциально-диагностические критерии разрыва и изъязвления ФП используются авторами. Дополнительная неоднородность исследований обусловлена недостаточной ясностью в описании ультразвуковых паттернов. Предложенные нами критерии являются результатом анализа литературных данных и многолетнего личного опыта авторов. Параметры чувствительности и специфичности описанных ключевых признаков приведены по отдельным литературным источникам, требуют дальнейшие исследования для их уточнения.

Заключение

Фиброзная покрышка атеросклеротической бляшки сонных артерий является ключевой динамической структурой, определяющей переход от стабильной к уязвимой бляшке, причем ее истончение, разрыв и изъязвление последовательно ассоциированы с нарастанием риска артерио-артериальной эмболии и ишемического инсульта, нередко развивающегося даже при стенозе менее 50%. В рутинной ультразвуковой практике достоверное количественное измерение толщины ФП недоступно, поэтому оптимально использовать качественную оценку по принципу “видно/не видно”. Разрыв ФП диагностируется с высокой точностью, тогда как выявление изъязвления имеет умеренную точность и может быть улучшено с помощью контрастного усиления, трехмерной реконструкции или

режима картирования низких скоростей кровотока. Клинически важным наблюдением является способность покрышки к заживлению после разрыва с формированием более толстой неоинтимы, что позволяет считать целесообразным динамическое ультразвуковое исследование. С учетом постоянного развития и совершенствования ультразвуковых технологий для получения убедительной доказательной базы требуется проведение дальнейших исследований по сопоставлению толщины и целостности ФП с морфологическими исследованиями. Несмотря на определенные трудности и ограничения в ультразвуковой оценке состояния ФП, мы считаем, что имеется достаточно доказательств, чтобы заключить, что ее описание является клинически значимым дополнением к традиционно указываемым структурным характеристикам бляшки и степени стеноза, что целесообразно для улучшения стратификации риска и индивидуализации лечения пациентов с каротидным атеросклерозом.

Участие авторов

Тимина И.Е. – концепция статьи, обзор и анализ публикаций по теме статьи, написание и редактирование текста статьи, подбор рисунков, разработка алгоритма ультразвукового исследования, ответственность за целостность всех частей статьи.

Балахонova Т.В. – обзор и анализ публикаций по теме статьи, подготовка и редактирование текста, подбор рисунков, разработка алгоритма ультразвукового исследования, утверждение окончательного варианта статьи.

Чечеткин А.О. – обзор и анализ публикаций по теме статьи, подготовка и редактирование текста, подбор рисунков, разработка алгоритма ультразвукового исследования, утверждение окончательного варианта статьи.

Шульгина Л.Э. – обзор и анализ публикаций по теме статьи, подготовка и редактирование текста, подбор рисунков, разработка алгоритма ультразвукового исследования, утверждение окончательного варианта статьи.

Authors' participation

Timina I.E. – concept of the article, review and analysis of publications, collection of literature, writing and editing the article, selection of figures, development of the ultrasound examination algorithm, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Balakhonova T.V. – review and analysis of publications, text preparation and editing, selection of figures, development of the ultrasound examination algorithm, approval of the final version of the article.

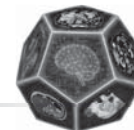
Chechetkin A.O. – review and analysis of publications, text preparation and editing, selection of figures, development of the ultrasound examination algorithm, approval of the final version of the article.

Shulgina L.E. – review and analysis of publications, text preparation and editing, selection of figures, development of the ultrasound examination algorithm, approval of the final version of the article.



Список литературы [References]

1. Feigin V.L., Brainin M., Norrving B. et al. World Stroke Organization: Global Stroke Fact Sheet 2025. *Int. J. Stroke*. 2025; 20 (2): 132-144. <https://doi.org/10.1177/17474930241308142>
2. Ornello R., Degan D., Tiseo C. et al. Distribution and Temporal Trends From 1993 to 2015 of Ischemic Stroke Subtypes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Stroke*. 2018; 49 (4): 814-819. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.117.020031>
3. Ospel J.M., Marko M., Singh N. et al. Prevalence of Non-Stenotic (<50%) Carotid Plaques in Acute Ischemic Stroke and Transient Ischemic Attack: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J. Stroke Cerebrovasc. Dis.* 2020; 29 (10): 105117. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2020.105117>
4. Zhang L., Guo Y., Zhou W. et al. Characteristics of non-stenotic carotid plaque in embolic stroke of undetermined source compared with cardiogenic embolism: a retrospective cross-sectional observational study. *BMC Neurol.* 2022; 22 (1): 315. <https://doi.org/10.1186/s12883-022-02846-4>
5. Naghavi M., Libby P., Falk E. et al. From vulnerable plaque to vulnerable patient: a call for new definitions and risk assessment strategies: Part II. *Circulation*. 2003; 108 (15): 1772-1778. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.0000087481.55887.C9>
6. Shah P.K. Mechanisms of plaque vulnerability and rupture. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2003; 41 (4 Suppl S): 15S-22S. [https://doi.org/10.1016/s0735-1097\(02\)02834-6](https://doi.org/10.1016/s0735-1097(02)02834-6)
7. Saba L., Cau R., Murgia A. et al. Carotid plaque-RADS: a novel stroke risk classification system. *JACC Cardiovascular Imaging*. 2024; 17 (1): 62-75. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2023.09.005>
8. Рагино Ю.И., Волков А.М., Чернявский А.М. Стадии развития атеросклеротического очага и типы нестабильных бляшек – патофизиологическая и гистологическая характеристика. *Российский кардиологический журнал*. 2013; 5 (103): 88-95. Ragino Yu.I., Volkov A.M., Chernyavskiy A.M. Stages of atherosclerotic plaque development and unstable plaque types: pathophysiologic and histologic characteristics. *Russian Journal of Cardiology*. 2013; 5 (103): 88-95. (In Russian)
9. Alonso-Herranz L., Albarrán-Juárez J., Bentzon J.F. Mechanisms of fibrous cap formation in atherosclerosis. *Front. Cardiovasc. Med.* 2023; 10: 1254114. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2023.1254114>
10. Virmani R., Burke A.P., Farb A., Kolodgie F.D. Pathology of the vulnerable plaque. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2006; 47 (8, Suppl.): C13-8. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2005.10.065>
11. Virmani R., Ladich E.R., Burke A.P., Kolodgie F.D. Histopathology of carotid atherosclerotic disease. *Neurosurgery*. 2006; 59 (5, Suppl. 3): S; discussion S3-13. <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000239895.00373.E4>
12. Redgrave J.N., Gallagher P., Lovett J.K., Rothwell P.M. Critical cap thickness and rupture in symptomatic carotid plaques: the oxford plaque study. *Stroke*. 2008; 39 (6): 1722-1729. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.107.507988>
13. Watanabe A., Saito K., Iihara K. et al. Ultrasonographic And Pathological Measurement Of Fibrous Cap In Rupture-prone Carotid Plaques Using Advanced Ultrasound Technology. *Stroke*. 2012; 43 (Suppl. 1): A2286. https://doi.org/10.1161/str.43.suppl_1.A2286
14. Shindo S., Fujii K., Shirakawa M. et al. Morphologic features of carotid plaque rupture assessed by optical coherence tomography. *Am. J. Neuroradiol.* 2015; 36 (11): 2140-2146. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A4404>
15. Saba L., Anzidei M., Marincola B.C. et al. Imaging of the carotid artery vulnerable plaque. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 2014; 37 (3): 572-585. <https://doi.org/10.1007/s00270-013-0711-2>
16. Pakizer D., Taffé P., Kozel J. et al. Non-invasive imaging of individual histological carotid plaque characteristics: A diagnostic accuracy meta-analysis. *Atherosclerosis*. 2025; 120391. <https://doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2025.120391>
17. van der Wal A.C., Becker A.E., van der Loos C.M., Das P.K. Site of intimal rupture or erosion of thrombotic coronary atherosclerotic plaques is characterized by an inflammatory process irrespective of the dominant plaque morphology. *Circulation*. 1994; 89 (1): 36-44. <https://doi.org/10.1161/01.cir.89.1.36>
18. Kolodgie F.D., Burke A.P., Farb A. et al. The thin-cap fibroatheroma: a type of vulnerable plaque: the major precursor lesion to acute coronary syndromes. *Curr. Opin. Cardiol.* 2001; 16 (5): 285-292. <https://doi.org/10.1097/00001573-200109000-00006>
19. Bentzon J.F., Otsuka F., Virmani R., Falk E. Mechanisms of plaque formation and rupture. *Circ. Res.* 2014; 114 (12): 1852-1866. <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.114.302721>
20. Балахонова Т.В., Тимина И.Е., Чечеткин А.О., Шульгина Л.Э. Ультразвуковые аспекты применения Carotid Plaque-RADS – системы стратификации риска острых ишемических церебральных событий. *Ангиология и сосудистая хирургия. Журнал имени академика А.В. Покровского*. 2025; 31 (4): 22-32. <https://doi.org/10.33029/1027-6661-2025-31-4-22-32>
21. Balakhonova T.V., Timina I.E., Chechetkin A.O., Shulgina L.E. Ultrasound aspects of the application of Carotid Plaque-RADS, a risk stratification system for acute ischemic cerebral events. *Angiology and Vascular Surgery. Journal named after Academician A.V. Pokrovsky*. 2025; 31 (4): 22-32. <https://doi.org/10.33029/1027-6661-2025-31-4-22-32> (In Russian)
22. Bentzon J.F., Sondergaard C.S., Kassem M., Falk E. Smooth muscle cells healing atherosclerotic plaque disruptions are of local, not blood, origin in apolipoprotein E knockout mice. *Circulation*. 2007; 116 (18): 2053-2061. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.107.722355>
23. Teng Z., Degnan A.J., Sadat U. et al. Characterization of healing following atherosclerotic carotid plaque rupture in acutely symptomatic patients: an exploratory study using *in vivo* cardiovascular magnetic resonance. *Cardiovasc. Magn. Reson.* 2011; 13 (1): 64. <https://doi.org/10.1186/1532-429X-13-64>
24. Saba L., Caddeo G., Sanfilippo R. et al. CT and ultrasound in the study of ulcerated carotid plaque compared with surgical results: potentialities and advantages of multidetector row CT angiography. *Am. J.*



- Neuroradiol.* 2007; 28 (6): 1061-1066.
<https://doi.org/10.3174/ajnr.A0486>
24. Brinjikji W., Rabinstein A.A., Lanzino G. et al. Ultrasound Characteristics of Symptomatic Carotid Plaques: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Cerebrovasc. Dis.* 2015; 40 (3-4): 165-174.
<https://doi.org/10.1159/000437339>
 25. Eyding J., Geier B., Staub D. Current strategies and possible perspectives of ultrasonic risk stratification of ischemic stroke in internal carotid artery disease. *Ultraschall Med.* 2011; 32 (3): 267-273.
<https://doi.org/10.1055/s-0029-1245924>
 26. ten Kate G.L., van Dijk A.C., van den Oord S.C. et al. Usefulness of contrast-enhanced ultrasound for detection of carotid plaque ulceration in patients with symptomatic carotid atherosclerosis. *Am. J. Cardiol.* 2013; 112 (2): 292-298. <https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2013.03.028>
 27. Kern R., Szabo K., Hennerici M., Meairs S. Characterization of carotid artery plaques using real-time compound B-mode ultrasound. *Stroke.* 2004; 35 (4): 870-875. <https://doi.org/10.1161/01.STR.0000120728.72958.4A>
 28. Rafailidis V., Chrysosgonidis I., Tegos T. et al. Imaging of the ulcerated carotid atherosclerotic plaque: a review of the literature. *Insights. Imaging.* 2017; 8 (2): 213-225. <https://doi.org/10.1007/s13244-017-0543-8>
 29. de Bray J.M., Baud J.M., Dauzat M. Consensus concerning the morphology and the risk of carotid plaques. *Cerebrovasc. Dis.* 1997; 7: 289-296.
<https://doi.org/10.1159/000108415>
 30. Kuk M., Wannarong T., Beletsky V. et al. Volume of carotid artery ulceration as a predictor of cardiovascular events. *Stroke.* 2014; 45 (5): 1437-1441.
<https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.114.005163>
 31. Fisher M., Paganini-Hill A., Martin A. et al. Carotid plaque pathology: thrombosis, ulceration, and stroke pathogenesis. *Stroke.* 2005; 36 (2): 253-257.
<https://doi.org/10.1161/01.STR.0000152336.71224.21>
 32. Sitzer M., Müller W., Rademacher J. et al. Color-flow Doppler-assisted duplex imaging fails to detect ulceration in high-grade internal carotid artery stenosis. *J. Vasc. Surg.* 1996; 23 (3): 461-465.
[https://doi.org/10.1016/s0741-5214\(96\)80011-5](https://doi.org/10.1016/s0741-5214(96)80011-5)
 33. Yuan J., Usman A., Das T. et al. Imaging Carotid Atherosclerosis Plaque Ulceration: Comparison of Advanced Imaging Modalities and Recent Developments. *Am. J. Neuroradiol.* 2017; 38 (4): 664-671. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A5026>
 34. Rafailidis V., Sidhu P.S. Vascular ultrasound, the potential of integration of multiparametric ultrasound into routine clinical practice. *Ultrasound.* 2018; 26 (3): 136-144. <https://doi.org/10.1177/1742271X18762250>
 35. Simonetto M., Dharmadhikari S., Bennett A. et al. Do Carotid Plaque Ulcers Heal? Potential Detection of Carotid Artery Plaque Healing by Carotid Ultrasound Imaging. *J. Ultrasound Med.* 2021; 40 (5): 973-980.
<https://doi.org/10.1002/jum.15472>
 36. Schminke U., Motsch L., Hilker L., Kessler C. Three-dimensional ultrasound observation of carotid artery plaque ulceration. *Stroke.* 2000; 31 (7): 1651-1655.
<https://doi.org/10.1161/01.STR.31.7.1651>

Для корреспонденции*: Тимина Ирина Евгеньевна – e-mail: timina68@mail.ru

Тимина Ирина Евгеньевна – доктор мед. наук, ведущий научный сотрудник отделения ультразвуковой диагностики ФГБУ “НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-7026-9417>

Балахонova Татьяна Валентиновна – доктор мед. наук, профессор, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории ультразвуковых методов исследования сосудов Института клинической кардиологии им. А.Л. Мясникова ФГБУ “НМИЦ кардиологии имени академика Е.И. Чазова” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-7273-6979>

Чечеткин Андрей Олегович – доктор мед. наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией ультразвуковых исследований института клинической и профилактической неврологии ФГБНУ “Российский центр неврологии и нейронаук”, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-8726-8928>

Шульгина Людмила Эдуардовна – доктор мед. наук, заведующая отделением функциональной и ультразвуковой диагностики ФГБУ “Поликлиника №1” Управления делами Президента Российской Федерации, Москва. <https://orcid.org/0009-0009-6325-8766>

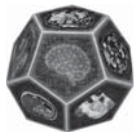
Contact*: Irina E. Timina – e-mail: timina68@mail.ru

Irina E. Timina – Doct. of Sci. (Med.), Leading Researcher, Ultrasound Diagnostics Department, A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-7026-9417>

Tatyana V. Balakhonova – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Chief Researcher, Head of the Laboratory of Ultrasound Methods for Vascular Research, A.L. Myasnikov Institute of Clinical Cardiology, National medical research centre of cardiology named after academician E.I. Chazov, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-7273-6979>

Andrey O. Chechetkin – Doct. of Sci. (Med.), Chief Researcher, Head of the Ultrasound Laboratory at the Institute of Clinical and Preventive Neurology, Russian Center of Neurology and Neurosciences, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-8726-8928>

Liudmila E. Shulgina – Doct. of Sci. (Med.), Head of the Department of Functional and Ultrasound Diagnostics, Polyclinic №1 of the office of the President of the Russian Federation Moscow. <https://orcid.org/0009-0009-6325-8766>



Предоперационные факторы риска фибрилляции предсердий и оценка вероятности ее возникновения в раннем послеоперационном периоде после коррекции тяжелого аортального стеноза на основании ультразвукового метода исследования

© Тарасевич С.В.^{1*}, Жерко О.М.², Галицкая С.С.¹, Крачак Д.И.³, Красько О.В.⁴

¹ Государственное учреждение “Республиканский клинический медицинский центр” Управления делами Президента Республики Беларусь; 223052 Минская обл., Минский р-н, Ждановичский с/с, 81/5, Республика Беларусь

² Учреждение образования “Белорусский государственный медицинский университет”; 220083 Минск, пр. Дзержинского, д. 83, Республика Беларусь

³ Государственное учреждение “Минский научно-практический центр хирургии, трансплантологии и гематологии”; 220087 Минск, ул. Семашко, д. 8, Республика Беларусь

⁴ Государственное научное учреждение “Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси”; 220012 Минск, ул. Сурганова, д. 6, Республика Беларусь

Цель исследования: определить факторы риска и вероятность развития послеоперационной фибрилляции предсердий (ПОФП) после биопротезирования аортального клапана (AoK) по поводу тяжелого аортального стеноза (АС).

Материал и методы. Проведено многоцентровое ретроспективно-проспективное исследование 181 пациента с тяжелым АС, которым в 2019–2025 гг. выполнена изолированная замена клапана с применением биологических протезов. Исследуемые лица были разделены на 2 группы: с послеоперационной ФП (ПОФП) ($n = 75$) и группа без ПОФП ($n = 106$). Медиана возраста составила 72 (67, 75) и 70 (67, 73) лет ($p = 0,206$) соответственно. Женщин было 49 (65,3%), 62 (58,5%) ($p = 0,438$) соответственно.

Результаты. Оценка факторов риска возникновения ФП в раннем послеоперационном периоде проводилась с использованием многофакторного анализа. Статистически значимыми факторами явились: диастолическая дисфункция левого желудочка (ДД ЛЖ) 2-й ($\beta = 0,90$, $p = 0,020$, ОШ 2,5 (1,2–5,4)) и 3-й степени ($\beta = 1,4$, $p = 0,006$, ОШ 4,0 (1,5–11,0)), наличие нарушений ритма в анамнезе до операции ($\beta = 4,04$, $p < 0,001$, ОШ 57 (7–67)), замена AoK с использованием вшиваемых биопротезов ($\beta = 0,90$, $p = 0,028$, 2,5 (1,1–5,6)). Для дальнейшего анализа факторов риска и расчета вероятности наступления послеоперационной ФП группа, включавшая пациентов с ПОФП, была разделена на 2 подгруппы: лица с наличием нарушения сердечного ритма в анамнезе до операции ($n = 32$) и с отсутствием нарушения ритма в анамнезе в дооперационном периоде ($n = 43$). В группе, включавшей пациентов с отсутствием нарушения сердечного ритма в дооперационном периоде, наличие ДД ЛЖ 2-й степени, ДД ЛЖ 3-й степени до оперативного лечения, шовный биологический протез, женский пол являлись статистически значимыми факторами риска развития ПОФП. В группе с наличием нарушения ритма в анамнезе до операции нет других статистически значимых факторов риска возникновения ПОФП и исходно шансы развития ПОФП увеличиваются в 57 раз. Если у пациента исходно имело место нарушение ДД ЛЖ 3-й степени и используется шовный клапан, риск возникновения ПОФП возрастает независимо от пола.

Заключение. Предоперационными факторами риска развития ФП в раннем послеоперационном периоде у лиц, перенесших хирургическую коррекцию тяжелого АС и не имевших нарушения сердечного ритма в анамнезе дооперационно, являлись: ДД ЛЖ 2-й и 3-й степени, женский пол и биопротезирование с использованием вшиваемых протезов. Наличие пароксизмальной ФП или частых предсердных экстрасистол до операции является основным фактором риска возникновения ПОФП. Вероятность развития ФП в раннем послеоперационном периоде после замены AoK по поводу тяжелого АС значимо увеличивается при наличии перечисленных факторов риска.

Ключевые слова: послеоперационная фибрилляция предсердий; аортальный стеноз; факторы риска; биопротезирование аортального клапана; диастолическая дисфункция

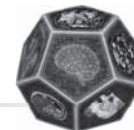
Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Тарасевич С.В., Жерко О.М., Галицкая С.С., Крачак Д.И., Красько О.В. Предоперационные факторы риска фибрилляции предсердий и оценка вероятности ее возникновения в раннем послеоперационном периоде после коррекции тяжелого аортального стеноза на основании ультразвукового метода исследования. *Медицинская визуализация*. 2026; 30 (3): 50–63. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1643>

Поступила в редакцию: 26.03.2026.

Принята к печати: 23.05.2026.

Опубликована online: 1.10.2026.



Preoperative risk factors for atrial fibrillation and assessment of the likelihood of its occurrence in the early postoperative period after correction of severe aortic stenosis based on ultrasound examination

© Svetlana V. Tarasevich^{1*}, Olga M. Zherko², Svetlana S. Galitskaya¹, Dmitry I. Krachak³, Olga V. Krasko⁴

¹ Republican Clinical Medical Center of the Administration of the President of the Republic of Belarus; 81/5, Zhdanovichy rural council, Minsk district 223028, Republic of Belarus

² Belarusian State Medical University; 83, Dzerzhinsky ave., Minsk 220083, Republic of Belarus

³ Minsk Scientific and Practical Center for Surgery, Transplantology and Hematology; 8, Semashko str., Minsk 220087, Republic of Belarus

⁴ The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus; 6, Surganova str., Minsk 220012, Republic of Belarus

The aim of the study: To determine the risk factors and likelihood of developing postoperative atrial fibrillation (POAF) after aortic valve replacement (AVR) for severe aortic stenosis (AS).

Materials and methods. A multicenter retrospective-prospective study was conducted among 181 patients with severe AS who underwent isolated valve replacement using biological prostheses in 2019–2025. The subjects were divided into two groups: with postoperative AF (POAF) ($n = 75$) and a group without POAF ($n = 106$). The median age was 72 [67, 75] and 70 [67, 73] years ($p = 0.206$), respectively. Female gender was 49 (65.3%), 62 (58.5%) ($p = 0.438$).

Results. Risk factors for AF development in the early postoperative period were assessed using multivariate analysis. Statistically significant factors included: left ventricular diastolic dysfunction (LVDD) grade 2 ($\beta = 0.90$, $p = 0.020$, OR 2.5 (1.2–5.4)) and grade 3 ($\beta = 1.4$, $p = 0.006$, OR 4.0 (1.5–11.0)), presence of rhythm disturbances in the anamnesis before surgery ($\beta = 4.04$, $p < 0.001$, OR 57 (7–67)), and replacement of the aortic valve using implanted bioprostheses ($\beta = 0.90$, $p = 0.028$, 2.5 (1.1–5.6)). For further analysis of risk factors and calculation of the probability of occurrence of postoperative AF, the group including patients with POAF was divided into two subgroups: individuals with the presence of cardiac arrhythmia in the anamnesis before surgery ($n = 32$), and without arrhythmia in the anamnesis in the preoperative period ($n = 43$). In the group of patients with no preoperative cardiac arrhythmia, the presence of grade 2 LVDD, grade 3 LVDD before surgery, a biological suture prosthesis, and female gender were statistically significant risk factors for developing POAF. In the group with in the anamnesis preoperative cardiac arrhythmia, there were no other statistically significant risk factors for developing POAF, and the odds of developing POAF increased 57-fold at baseline. If a patient had grade 3 LVDD at baseline and a biological suture prosthesis was used, the risk of developing POAF increased regardless of gender.

Conclusion. Preoperative risk factors for the development of AF in the early postoperative period in individuals who underwent surgical correction of severe AS and did not have cardiac arrhythmia preoperatively were: LVDD grades 2 and 3, female gender, and bioprosthetics using implanted prostheses. The presence of paroxysmal AF or frequent atrial extrasystoles before surgery is the main risk factor for the development of POAF. The likelihood of developing AF in the early postoperative period after aortic valve replacement for severe AS significantly increases in the presence of the above-mentioned risk factors.

Keywords: postoperative atrial fibrillation; aortic stenosis; risk factors; aortic valve replacement; diastolic dysfunction

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Tarasevich S.V., Zherko O.M., Galitskaya S.S., Krachak D.I., Krasko O.V. Preoperative risk factors for atrial fibrillation and assessment of the likelihood of its occurrence in the early postoperative period after correction of severe aortic stenosis based on ultrasound examination. *Medical Visualization*. 2026; 30 (3): 50–63. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1643>

Received: 26.03.2026.

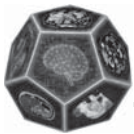
Accepted for publication: 23.05.2026.

Published online: 1.10.2026.

Введение

Фибрилляция предсердий (ФП) – наиболее распространенная форма аритмии, встречающаяся у 2% лиц в общей популяции [1]. ФП ассоциирована с увеличением риска инсульта, деменции, инфаркта миокарда, внезапной коронарной смерти, сердечной недостаточности, хронической болезни почек и заболевания периферических артерий, а также связана с увеличением риска смертности, преимущественно среди пациентов женского пола. Вероятность возникновения ФП существенно уве-

личивается с возрастом [1, 2]. Выделяют ФП, связанную с клапанной патологией [1–3]. Дегенеративный стеноз аортального клапана (АоК) является наиболее частой вальвулопатией, требующей хирургического лечения, и может быть связан с развитием нарушений ритма. Несмотря на совершенствование кардиохирургических методик, протезирование АоК на открытом сердце может сопровождаться такими осложнениями, как кровотечение, тромбоэмболические осложнения и аритмии. Развитие ФП в раннем послеоперационном периоде после про-



тезирования АоК по поводу тяжелого аортального стеноза (АС) – частое осложнение, ухудшающее прогноз и увеличивающее сроки госпитализации. По данным доступных литературных источников, частота возникновения ФП после хирургической замены АоК достигает 30–50% случаев [4].

Понимание предикторов послеоперационной фибрилляции предсердий (ПОФП) необходимо для оптимизации тактики лечения пациента в периоперационном периоде.

Цель исследования: определить факторы риска и вероятность развития ПОФП после биопротезирования аортального клапана по поводу тяжелого АС.

Материал и методы

На базе государственных учреждений “Республиканский клинический медицинский центр” Управления делами Президента Республики Беларусь, “Минский научно-практический центр хирургии, трансплантологии и гематологии” и “Республиканский научно-практический центр «Кардиология»” проведено ретроспективно-проспективное исследование 181 пациента с тяжелым АС, которым в 2019–2025 гг. выполнена изолированная замена клапана с применением перикардимальных шовных биологических протезов – Carpentier-Edwards Perimount Aortic Heart Valve и его модификаций (CE Perimount) ($n = 97$), Trifecta ($n = 31$) и бесшовных биопротезов – Perceval ($n = 53$).

Исследование соответствует этическим стандартам, изложенным в Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации “Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека” с поправками 2000 г. Пациенты, участвующие в исследовании, дали письменное информированное согласие на участие в исследовании, утвержденное этическим комитетом ГУ “Республиканский клинический медицинский центр” Управления делами Президента Республики Беларусь (номер протокола заседания №7 от 06.03.2024 г.).

Критериями включения в исследование были возраст пациентов старше 60 лет, синусовый ритм при госпитализации для выполнения оперативного лечения тяжелого АС, тяжелый АС различной этиологии.

Критериями исключения являлись стенозы и умеренная/тяжелая регургитация на митральном, трикуспидальном клапанах, клапане легочной артерии, врожденные пороки сердца, снижение фракции выброса левого желудочка менее 50%, стенозирование коронарных артерий, требующее реваскуляризации, перенесенный в прошлом инфаркт миокарда, заболевания щитовидной железы с изменением нормальных показателей уровня гормонов,

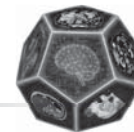
хроническая почечная недостаточность, требующая проведения гемодиализа, железодефицитная анемия средней и тяжелой степени, хронические болезни дыхательной системы с дыхательной недостаточностью, категорический отказ пациента от участия в исследовании.

Эхокардиография (ЭхоКГ) выполнена трансторакальным доступом на ультразвуковых системах Vivid E 9 и Vivid E 95 (GE Healthcare) датчиками с частотой 2,5–5,0 МГц. Методика оценки функции протезов с помощью импульсволнового (PW), непрерывноволнового (CW) и цветового доплера были аналогичны тем, которые используются при оценке нативного клапана. Стандартно исследовались такие параметры, как максимальная систолическая скорость (макс. сист. скорость, м/с), максимальный и средний трансклапанные градиенты давления (МГД и СГД, мм рт.ст.), эффективная площадь отверстия АоК (ЭПО, см^2). Клапанный-сосудистое сопротивление (КСС (Z)) рассчитывалось по формуле: $Z (\text{мм рт. ст./мл/м}^2) = (\text{сист. АД} + \text{СГД АоК}) / \text{индекс УО}$, где сист. АД – систолическое артериальное давление, СГД АоК – средний градиент давления аортального клапана, индекс УО – индекс ударного объема.

Для оценки состояния левого желудочка (ЛЖ) исследовались следующие переменные: толщина миокарда межжелудочковой перегородки (МЖП, мм) и задней стенки ЛЖ (ЗСЛЖ, мм) в конце диастолы в В-режиме. Конечнодиастолический (КДО, мл), конечно-систолический объемы (КСО, мл) ЛЖ, фракцию выброса ЛЖ (ФВ, %), объемы левого (ЛП, мл) и правого (ПП, мл) предсердий определяли на основании биплановой методики дисков Симпсона. Стандартно оценивали передне-задний размер ЛП (ПЗР ЛП), диаметр кольца митрального клапана (МК) – во время диастолы. Массу миокарда ЛЖ (ММЛЖ, г) вычисляли в В-режиме по формуле “площадь-длина” и далее индексировали к площади поверхности тела (ИММ, г/м^2) и к росту (м), возведенному в степень 2,7 (ИММ, $\text{г/м}^{2,7}$).

Для определения геометрии ЛЖ рассчитывали: относительную толщину стенки (ОТС) по формуле $\text{ОТС} = (\text{ТЗС} \cdot 2) / \text{КДР}$, где КДР – конечно-диастолический размер левого желудочка (мм), ТЗС – толщина задней стенки ЛЖ в конце диастолы (мм) в В-режиме и индекс геометрии ЛЖ (ММЛЖ / КДО, г/мл).

Сократительная функция миокарда ЛЖ анализировалась с помощью ФВ ЛЖ, УО ЛЖ, тканевой доплерографии в импульсволновом режиме по скоростям движения латерального ($S'_{\text{лат}}$, см/с), септального ($S'_{\text{септ}}$, см/с) краев фиброзного кольца МК и недоплерографической методикой оценки движения миокарда – “спекл-слежения” с расчетом глобаль-



ной продольной систолической деформации ЛЖ (GLPS, %). Систолическую экскурсию кольца МК (MAPSE, мм) рассчитывали как амплитуду систолической экскурсии кольца в продольном направлении из апикальной четырехкамерной позиции в М-режиме.

Диастолическую дисфункцию ЛЖ (ДД ЛЖ) устанавливали на основании современных критериев 2025 г. Американского общества эхокардиографии и метода, разработанного О.М. Жерко и соавт. в 2021 г. [5, 6]. При использовании этих методов расхождений результатов определения у включенных в исследование пациентов ДД ЛЖ и ее степени тяжести получено не было. Скорости пиков Е, А (м/с), отношение скоростей пиков Е и А (Е/А) трансмитрального диастолического кровотока (МК), время замедления пика Е МК (DT_E , мс), пиковые скорости раннего диастолического ($e'_{септ}$, $e'_{лат}$, см/с) и систолического ($S'_{септ}$, $S'_{лат}$, см/с) движений септальной и латеральной частей митрального фиброзного кольца измерялись по общеизвестной методике.

Для оценки состояния правого желудочка (ПЖ) использовались стандартные методы ЭхоКГ: конечно-диастолическая (КДП, $см^2$) и конечно-систолическая (КСП, $см^2$) площади ПЖ, рассчитанные путем трассировки ПЖ по эндокарду. Систолическая функция ПЖ оценивалась по фракции изменения площади (ФИП, %). По стандартной методике проводили измерение систолического давления в легочной артерии ($DLA_{сист}$, мм рт.ст.) и давления заклинивания легочных капилляров (ДЗЛК). Тяжелый стеноз АоК устанавливали на общепринятом основании следующих критериев: пиковая трансклапанная скорость > 4 м/с, средний градиент > 40 мм рт.ст., эффективная площадь АоК < 1 $см^2$, индекс площади АоК $< 0,6$ $см^2/м^2$. В случае низкотокового низкоградиентного тяжелого АС с сохраненной ФВ (более 50%) эффективная площадь отверстия составляет ≤ 1 $см^2$, средний градиент давления < 40 мм рт.ст., индекс УО ≤ 35 мл/ $м^2$.

Субпороговая (латентная) систолическая дисфункция ЛЖ определялась на основании результатов выполнения 2D-Speckle-Tracking-ЭхоКГ, пороговым значением которой при сохраненной ФВ ЛЖ является абсолютное значение GLS менее 16% [7].

Перед ЭхоКГ по стандартной методике у пациента измеряли АД. Все гемодинамические транспротезные показатели проанализированы после снижения цифр АД менее 140/90 мм рт.ст.

Пациентам в послеоперационном периоде выполнялись электрокардиография (ЭКГ) в 12 отведениях, 24-часовое холтеровское мониторирование (ХМ) ЭКГ.

Статистическую обработку полученных данных осуществляли в статистическом пакете R, версия

4.5 [R Core Team (2025). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.]

Для большинства количественных переменных распределение отличалось от нормального, поэтому полученные результаты оценивали непараметрическими методами. Количественные значения изучаемых параметров по результатам описательной статистической обработки данных представляли в виде медианы, 25% нижнего и 75% верхнего квартильных размахов – Me [LQ, UQ], сравнение количественных показателей проводилось с помощью критерия Манна-Уитни.

Качественные показатели представлены частотами и процентами в группе. При исследовании таблиц сопряженности использовался критерий χ^2 , в случае нарушения предположений, лежащих в основе критерия χ^2 , использовался точный критерий Фишера.

Многофакторный анализ проводился с помощью логистической регрессии с последующим редуцированием факторов по алгоритму stepwise [Johnsson T. A procedure for stepwise regression analysis. Statistical Papers. 1992; 33: 21-29. <https://doi.org/10.1007/BF02925308>] и расчетом отношения шансов (ОШ).

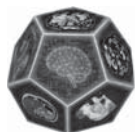
Подгрупповой анализ выполнялся с использованием иерархической логистической регрессии с расчетом ОШ. Вероятности с 95% доверительными интервалами в различных подгруппах оценивались на основе байесовского моделирования.

При проверке статистических гипотез вероятность ошибки первого рода α была принята равной 0,05.

Результаты исследования

Частота ПОФП у пациентов с тяжелым АС, которым была выполнена замена АоК биологическими протезами, составила 41,4% ($n = 75$). ПОФП развилась в раннем послеоперационном периоде в сроки 3 дней [2, 4] и определялась как устойчивые пароксизмы ФП, зафиксированные на ЭКГ, или приступы ФП более 30 с по данным ХМ ЭКГ после операции [8, 9].

Так как аортальные биопротезы Carpentier-Edwards Perimount, Carpentier-Edwards Perimount Magna и Carpentier-Edwards Perimount Magna Ease представляют собой эволюционную линейку однотипных перикардиальных клапанов и не продемонстрировали статистически значимых различий по гемодинамическим характеристикам и параметрам структурно-функционального ремоделирования сердца на этапе выполнения предоперационных и отдаленных послеоперационных (не ранее года



после оперативного лечения) трансторакальных эхокардиографических исследований, пациенты с данными типами протезов были объединены в одну группу [10].

Далее выполнена сравнительная оценка клинических характеристик пациентов, гемодинамических и структурно-функциональных параметров сердца у респондентов с биологическими аортальными протезами Trifecta и Carpentier-Edwards Perimount. Группы сравнения не показали статистически значимых различий по всем анализируемым показателям, поэтому также были объединены между собой.

При сравнительном анализе клинических и эхокардиографических данных в дооперационном периоде в группах с имплантацией бесшовного биологического протеза и вшиваемого биологического протеза определено, что группы сравнения сопоставимы по гемодинамическим показателям и большинству структурно-функциональных характеристик сердца, за исключением пола [10].

В нашем исследовании не обнаружено статистически значимой разницы между частотой развития ФП в раннем послеоперационном периоде среди пациентов с шовными биологическими протезами CE Perimount 44 (45,4%), Trifecta 14 (45,2%) и бесшовными биопротезами Perceval 17 (32,1%) ($p = 0,07$). На основании изложенного для установления предоперационных клинических и эхокардиографических факторов риска развития ПОФП принято решение об объединении всех групп пациентов с протезированием АОК, выполненным в связи с тяжелым АС.

В качестве сопутствующей патологии у обследованных лиц наиболее часто встречалась ишемическая болезнь сердца (ИБС), артериальная гипертензия (АГ), хроническая сердечная недостаточность (ХСН). Клиническая характеристика пациентов представлена в табл. 1. Включенные в исследование группы пациентов не имели статистически значимых отличий по распространенности коморбидных заболеваний. Нарушения сердечного ритма в общей группе обследованных в анамнезе до операции представлены пароксизмами ФП у 17 (9,4%) пациентов, частыми предсердными экстрасистолами – у 27 (14,9%), частыми желудочковыми экстрасистолами (ЖЭ) – у 8 (4,4%), нарушениями проводимости – блокадой левой ножки пучка Гиса – у 9 респондентов (4,9%), атриовентрикулярной блокадой I степени – у 2 (1,1%). При статистическом анализе не было обнаружено связи с нарушением проводимости ЛЖ и частыми ЖЭ дооперационно с возникновением ФП в раннем

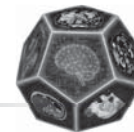
Таблица 1. Клиническая характеристика пациентов

Table 1. Clinical characteristics of patients

Параметр Parameter	Группа с ПОФП Group with POAF n = 75	Группа без ПОФП Group without POAF n = 106	p
Пол / Gender, n (%): женский / female мужской / male	49 (65.3) 26 (34.7)	62 (58.5) 44 (41.5)	0.438
Возраст, годы Age, years	72 [67, 75]	70 [67, 73]	0.206
ППТ, м ² BSA, m ²	1.9 [1,8, 1,9]	1.8 [1,7, 2,0]	0.404
ИМТ, кг/м ² BMI, kg/m ²	29.0 [25.8, 32.3]	27.4 [25.7, 31.5]	0.328
ИБС, n (%) IHD, n (%)	63 (84,0)	87 (82,1)	0.271
ХСН ФК, NYHA, n (%) CHF, NYHA, n (%)			0.535
I	4 (5.3)	9 (8.5)	
II	57 (76.0)	73 (68.9)	
III	14 (18.7)	24 (22.6)	
Наличие АГ Presence of AH, n (%)	70 (93.4)	101 (95.3)	0.885
Степень АГ, n (%) Degree of AH, n (%)			0.718
1-я	12 (16.0)	23 (21.7)	
2-я	56 (74.7)	74 (69.8)	
3-я	2 (2.7)	4 (3.8)	
СД 2 типа, n (%) DM type 2, n (%)	14 (18.7)	25 (23.6)	0.542
Наличие ХБП, n (%) Presence of CKD, n (%)	22 (29.3)	24 (22.6)	0.308
Гемоглобин, г/л Hemoglobin, g/l	129.0 [119,5; 139,7]	131,5 [123,0; 138,0]	0.599
СРБ, мг/л CRP, mg/l	1.8 [0.8; 3.3]	1.9 [0.8; 3.7]	0,859
ЧСС, ударов в минуту HR, beats per minute	68 [61, 72]	66 [60, 73]	0.792
Нарушения ритма в анамнезе, n (%) Heart rhythm disturbances in the anamnesis, n (%)	32 (42.7)	12 (11.3)	<0.001

Примечание. ППТ – площадь поверхности тела, ИМТ – индекс массы тела, ИБС – ишемическая болезнь сердца, ХСН – хроническая сердечная недостаточность, АГ – артериальная гипертензия, СД – сахарный диабет, ХБП – хроническая болезнь почек, СРБ – С-реактивный белок, ЧСС – частота сердечных сокращений.

Note. BSA – body surface area, BMI – body mass index, CHD – ischemic heart disease, CHF – chronic heart failure, AH – arterial hypertension, DM – diabetes mellitus, CKD – chronic kidney disease, CRP – C-reactive protein, HR – heart rate.



послеоперационном периоде. Между тем пароксизмы ФП и частые предсердные экстрасистолы в равной степени являлись значимым фактором риска развития ФП в раннем послеоперационном периоде, поэтому данные случаи анализировались как пациенты с нарушением ритма до операции.

Пациенты, включенные в исследование, были разделены на 2 группы сравнения: группа с ПОФП ($n = 75$) и группа без ПОФП ($n = 106$).

Предоперационная трансторакальная ЭхоКГ является важным методом для выявления пациентов высокого риска развития ПОФП. Ультразвуковые предикторы можно разделить на несколько групп, отражающих основные патофизиологические механизмы: увеличение постнагрузки, приводящей к перегрузке ЛЖ, с последующими ремоделированием и диастолической дисфункцией, структурно-функциональные изменения ЛП и нарушения трансклапанной, в том числе постоперационной транспротезной гемодинамики [6, 11-13, 22]. В исследовании проанализированы показатели ЭхоКГ в группах сравнения в дооперационном периоде (табл. 2).

В соответствии с полученными данными предоперационные эхокардиографические показатели – объем ЛП, индекс объема ЛП, диаметр кольца МК, $E/e'_{\text{среднее}}$ были статистически значимо выше, значения ФВ ЛЖ, MAPSE – статистически значимо ниже в группе с развившейся ПОФП по сравнению с пациентами без ПОФП. Степень ДД ЛЖ, установленная до оперативного лечения, также статистически значимо различалась в группах сравнения (рис. 1).

Кроме того, выполнена оценка эхокардиографических показателей в группах сравнения в раннем послеоперационном периоде (табл. 3).

Оценка факторов риска возникновения ФП в раннем послеоперационном периоде проводилась с использованием многофакторного анализа, результаты которого представлены в табл. 4. Статистически значимыми факторами явились: диастолическая дисфункция ЛЖ 2-й и 3-й степени, наличие нарушений ритма в анамнезе, замена Аок с использованием вшиваемых биопротезов.

При изучении клинических характеристик исследуемых групп (см. табл. 1) дооперационные нарушения сердечного ритма статистически значимо чаще наблюдались в группе сравнения 1. При многофакторном логистическом регрессионном анализе нарушение ритма, имевшее место в анамнезе, являлось значимым фактором риска развития ФП в раннем послеоперационном периоде ($\beta = 4,04$, $p < 0,001$, ОШ 57 (7-670)) (табл. 5).

Для дальнейшего анализа факторов риска и расчета вероятности наступления ПОФП группа, включавшая пациентов с ПОФП, была разделена на 2 подгруппы: лица с наличием нарушения сердечного

ритма в анамнезе ($n = 32$) и респонденты с отсутствием нарушения ритма в анамнезе ($n = 43$). Пациенты в исследуемых подгруппах были сопоставимы по гемодинамическим показателям и структурно-функциональным характеристикам сердца. Для определения факторов риска в подгруппах сравнения применялся многофакторный логистический регрессионный анализ, результаты которого представлены в табл. 5.

В группе, включавшей пациентов с отсутствием нарушения сердечного ритма в анамнезе, наличие ДД ЛЖ 2-й степени, ДД ЛЖ 3-й степени до оперативного лечения, шовный биологический протез, женский пол являлись статистически значимыми факторами риска развития ПОФП. В группе с наличием нарушения ритма в анамнезе нет других статистически значимых факторов риска возникновения ПОФП и исходно шансы развития ПОФП увеличиваются в 57 раз (см. табл. 5, рис. 2).

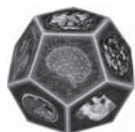
Расчет вероятности наступления ПОФП у пациентов с тяжелым АС после замены Аок биологическими протезами был выполнен по результатам многофакторного анализа (табл. 6).

При оценке вероятности наступления ПОФП в общей группе было обнаружено, что нарушения сердечного ритма, имевшие место в анамнезе до оперативного лечения, существенно повышают вероятность наступления ПОФП у всех пациентов. У лиц с отсутствием нарушения ритма ДД ЛЖ 2-й степени, имевшая место в дооперационном периоде, женский пол, использование вшиваемого биопротеза увеличивают вероятность ПОФП на 53,7% (36; 71,7). В случае наличия ДД ЛЖ 3-й степени, женского пола и имплантации вшиваемого протеза вероятность ПОФП составляет 56,8% (22,2; 86,9). Если у пациента исходно имело место нарушение ДД ЛЖ 3-й степени и используется шовный клапан, риск возникновения ПОФП возрастает независимо от пола.

Таким образом, было установлено, что нарушение сердечного ритма, ДД ЛЖ 2-й и 3-й степени, имевшие место до оперативного лечения, женский пол увеличивают вероятность наступления ПОФП. Следовательно, пациентам с наличием перечисленных факторов риска предпочтительнее применять для замены Аок при тяжелом АС бесшовный вид биологического протеза.

Обсуждение

Из литературных источников известно, что у мужчин более высокий риск развития ФП в течение жизни по сравнению с женщинами [1]. Распространенность ФП среди мужчин примерно в 1,5-2 раза выше до 75 лет. Однако в возрасте 75-80 лет различия частоты ФП, зависящие от пола пациен-

**Таблица 2.** Показатели комплексной предоперационной эхокардиографической оценки сердца у пациентов с тяжелым стенозом АоК в группах сравнения**Table 2.** Indicators of comprehensive preoperative echocardiographic assessment of the heart in patients with severe aortic stenosis in comparison groups

Параметр Parameter	Группа с ПОФП, Group with POAF n = 75	Группа без ПОФП, Group without POAF n = 106	p
Количество створок АоК, n (%) Number leaflets of AoV, n (%) двустворчатый / bicuspid трехстворчатый / tricuspid	12 (16.2) 62 (83.8)	18 (17.1) 87 (82.9)	>0.99
Диаметр кольца АоК, мм AoV annulus diameter, mm	23.0 [22.0, 24.0]	23.0 [21.0, 24.0]	0.673
Z АоК, мм рт. ст./мл/м ² Z AoV mmHg. st./ml/m ²	5.1 [4.5, 5.9]	5.0 [4.3, 5.8]	0.399
ЭПО, см ² ЕОА, см ²	0.8 [0.7, 0.9]	0.8 [0.7, 0.9]	0.439
СГД, мм рт.ст. MG, mmHg	53.0 [42.5, 74.0]	50.0 [42.0, 62.0]	0.252
Объем ЛП, мл LA volume, ml	77 [68, 89]	68 [58, 82]	0.006
Индекс объема ЛП, мл/м ² LA volume index, ml/m ²	39.8 [35.6, 46.2]	36.7 [33.1, 42.9]	0.014
ПЗР ЛП, мм APS LA, mm	42 [39, 45]	40 [38, 44]	0.058
Диаметр кольца МК, мм Annulus diameter MV, mm	34 [32, 35]	33 [30, 35]	0.009
Отношение объем ЛП/диаметр кольца МК The ratio of the volume of the LA/ annulus diameter MV	2.21 [2.00, 2.53]	2.12 [1.86, 2.44]	0.064
Отношение индекса объема ЛП/диаметр кольца МК The ratio of the volume index of the LA/ annulus diameter MV	1.17 [1.09, 1.30]	1.15 [1.02, 1.27]	0.189
ММЛЖ, г MMLV, g	260 [212, 299]	233 [188, 286]	0.051
Индекс ММЛЖ, г/м ² MMLV index, ml/m ²	138.1 [114.8, 157.8]	126.2 [109.5, 151.9]	0.140
Индекс ММЛЖ, г/м ^{2.7} MMLV index, g/ m ^{2.7}	65.5 [52.1, 80.3]	61.4 [50.9, 72.7]	0.216
ОТС, мм RWT, mm	0.47 [0.40, 0.54]	0.47 [0.41, 0.54]	0.959
Толщина МЖП, мм Thickness IVS, mm	13 [12, 15]	13 [12, 14]	0.546
Толщина ЗСЛЖ, мм Thickness BWLV, mm	12 [10, 13]	11 [10, 13]	0.689
КДО, мл LV EDV, ml	108 [88.5, 120]	106 [89, 127]	0.797
Индекс КДО, мл/м ² LV EDV index, ml/m ²	57.2 [48.7, 64]	56.0 [49.5, 66.2]	0.957
КСО, мл LV ESV, ml	42 [32, 50]	39 [30, 49]	0.233
Индекс КСО, мл/м ² LV ESV index, ml/m ²	21.6 [17.9, 26.3]	21.2 [17, 25]	0.270

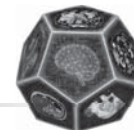


Таблица 2 (окончание).

Table 2 (end).

Параметр Parameter	Группа с ПОФП, Group with POAF n = 75	Группа без ПОФП, Group without POAF n = 106	p
ФВ ЛЖ, % LV EF, %	60.0 [57.0, 65.0]	62.5 [58.0, 68.0]	0.028
УО ЛЖ, мл SV LV, ml	63.0 [56.5, 76.0]	66.0 [54.5, 78.0]	0.595
GLPS, % GLPS, %	-16.2 [-19.7, -11.2]	-15.7 [-17.5, -14.5]	0.484
MAPSE, мм MAPSE, mm	12.5 [11, 14]	14.0 [12, 14]	0.011
S _{септ} ['] см/с S _{septal} ['] cm/s	6 [5, 7]	6 [5, 7]	0.147
S _{лат} ['] см/с S _{lateral} ['] cm/s	7 [6, 8]	7 [6, 8]	0.117
e _{лат} ['] см/с e _{lateral} ['] cm/s	6 [5, 7]	6 [5, 7]	0.331
E/e _{лат} ['] см/с E/e _{lateral} ['] cm/s	13.2 [10, 17.3]	11.7 [9.1, 15]	0.075
e _{септ} ['] см/с e _{septal} ['] cm/s	5 [4, 6]	5 [4, 6]	0.322
E/e _{септ} ['] см/с E/e _{septal} ['] cm/s	15 [11.4, 20]	14 [10, 16.8]	0.079
E/e _{среднее} ['] см/с E/e _{mean} ['] cm/s	14.2 [10.5, 17.5]	12.5 [9.9, 15.2]	0.048
E/A, см/с E/A, cm/s	0.8 [0.7, 0.9]	0.7 [0.6, 1.1]	0.391
ДЗЛК, ед. Вуда PCWP, Wood Units	18.2 [14.3, 23.3]	16.4 [13.2, 20.5]	0.075
Степень ДД ЛЖ, n (%) Degree of DD LV, n (%)			0.009
1	19 (25.3)	48 (45.3)	
2	38 (50.7)	46 (43.4)	
3	18 (24.0)	12 (11.3)	
Скорость ТР, м/с TR velocity, m/s	2.7 [2.5, 2.9]	2.6 [2.4, 2.9]	0.201
ДЛАсист, мм рт.ст. PLAsyst, mm Hg	32 [27, 37]	30 [25, 35]	0.091
Индекс объема ПП, мл/м ² RA volume index, ml/m ²	25 [22, 29]	26 [22, 30]	0.448
КДП ПЖ, см ² RV EDA, cm ²	16.7 [15, 19.6]	17.4 [15, 21]	0.381
КСП ПЖ, см ² RV ESA, cm ²	9 [7.6, 11]	9.5 [7.8, 12]	0.258
ФИП ПЖ, % RV FAC, %	45.7 [40.7, 50]	44.4 [40.2, 48.9]	0.423

Примечание. УО ЛЖ – ударный объем левого желудочка.

Note. LV SV – left ventricular stroke volume.

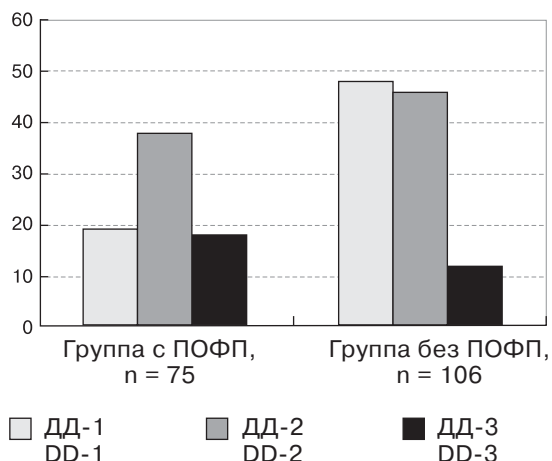
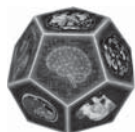


Рис. 1. Характеристика состояния диастолической функции в исследуемых группах в дооперационном периоде.

ДД-1 – диастолическая дисфункция ЛЖ 1-й степени до оперативного лечения, ДД-2 – диастолическая дисфункция ЛЖ 2-й степени до оперативного лечения, ДД-3 – диастолическая дисфункция ЛЖ 3-й степени до оперативного лечения.

Fig. 1. Characteristics of the state of diastolic function in the study groups in the preoperative period.

DD-1 – diastolic dysfunction of the LV grade 1 before surgical treatment, DD-2 – diastolic dysfunction of the LV grade 2 before surgical treatment, DD-3 – diastolic dysfunction of the LV grade 3 before surgical treatment.

Таблица 3. Характеристики транспротезной гемодинамики в раннем послеоперационном периоде в группах сравнения

Table 3. Characteristics of transprosthetic hemodynamics in the early postoperative period in the comparison groups

Параметр Parameter	Группа с ПОФП, Group with POAF n = 75	Группа без ПОФП, Group without POAF n = 106	p
Диаметр протеза, мм Diameter of the prosthesis, mm	23.0 [21.0, 24.5]	23.0 [21.0, 25.0]	0.204
ППН, n (%) PPM, n (%)	17.0 (23,0)	25.0 (23,6)	>0.99
Z протеза, мм рт.ст./мл/м ² Z of the prosthesis, mm Hg/ml/m ²	4.1 [3.4, 4.6]	3.8 [3.5, 4.1]	0.283
ЭПО, см ² EOA, cm ²	1.8 [1.6, 2.1]	1.9 [1.6, 2.2]	0.962
СГД, мм рт.ст. MG, mm Hg	15.0 [11.0, 18.0]	14.0 [11.0, 17.0]	0.353

Примечание. ППН – протез-пациент несоответствие.

Note. PPM – prosthesis-patient mismatch.

Таблица 4. Многофакторный анализ факторов риска возникновения ПОФП

Table 4. Multivariate analysis of risk factors for the development of POAF

Факторы риска Risk factors	Коэффициент β Coefficient β	p	ОШ (95% ДИ) OR (95% CI)
Нарушение ритма в анамнезе Heart rhythm disturbance in the anamnesis	1.82	<0.001	6.2 (2.9-14.0)
ДД ЛЖ 2-й степени vs ДД 1-й степени до операции LVDD grade 2 vs DD grade 1 before surgery	0.90	0.020	2.5 (1.2-5.4)
ДД ЛЖ 3-й степени vs ДД 1-й степени до операции LVDD grade 3 vs DD grade 1 before surgery	1.40	0.006	4.0 (1.5-11.0)
Вид протеза: шовные vs бесшовные протезы Type of prosthesis: suture and sutureless bioprostheses	0.90	0.028	2.5 (1.1-5.6)
Пол мужской vs женский Gender male vs female	-0.61	0.100	0.54 (0.26-1.11)

Примечание. ОШ – отношение шансов, ДИ – доверительный интервал.

Note. OR – odds ratio, CI – confidence interval.

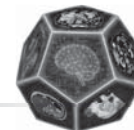


Таблица 5. Многофакторный анализ факторов риска возникновения ПОФП в подгруппах с наличием и отсутствием нарушения сердечного ритма в анамнезе до операции

Table 5. Multivariate analysis of risk factors for the development of POAF in subgroups with and without cardiac arrhythmia before surgery before surgery

Факторы риска Risk factors	Коэффициент β Coefficient β	p	ОШ (95% ДИ) OR (95% CI)
Нарушение ритма в анамнезе Heart rhythm disturbance before surgery in the anamnesis	4.04	<0.001	57 (7-670)
Нет нарушений ритма в анамнезе до операции No rhythm disturbances in the anamnesis before surgery			
ДД ЛЖ 2-й степени vs ДД 1-й степени до операции LVDD grade 2 vs DD grade 1 before surgery	1.20	0.015	3.3 (1.3-9.1)
ДД ЛЖ 3-й степени vs ДД 1-й степени до операции LVDD grade 3 vs DD grade 1 before surgery	2.34	<0.001	10.4 (3.2-38)
Вид протеза: шовные vs бесшовные протезы Type of prosthesis: suture and sutureless bioprostheses	1.52	0.004	4.6 (1.7-14)
Пол мужской vs женский Gender male vs female	-0.91	0.046	0.4 (0.16-0.96)
Есть нарушения ритма в анамнезе до операции There are rhythm disturbances in the anamnesis before the operation			
ДД ЛЖ 2-й степени vs ДД 1-й степени до операции LVDD grade 2 vs DD grade 1 before surgery	0.3	0.712	1.4 (0.26-7)
ДД ЛЖ 3-й степени vs ДД 1-й степени до операции LVDD grade 3 vs DD grade 1 before surgery	-0.78	0.385	0.46 (0.07-2.7)
Вид протеза: шовные vs бесшовные протезы Type of prosthesis: suture and sutureless bioprostheses	-0.41	0.656	0.66 (0.08-3.7)
Пол мужской vs женский Gender male vs female	-0.26	0.718	0.77 (0.18-3.3)

Рис. 2. Сравнение факторов риска развития ПОФП между исследуемыми группами по результатам многофакторного анализа.

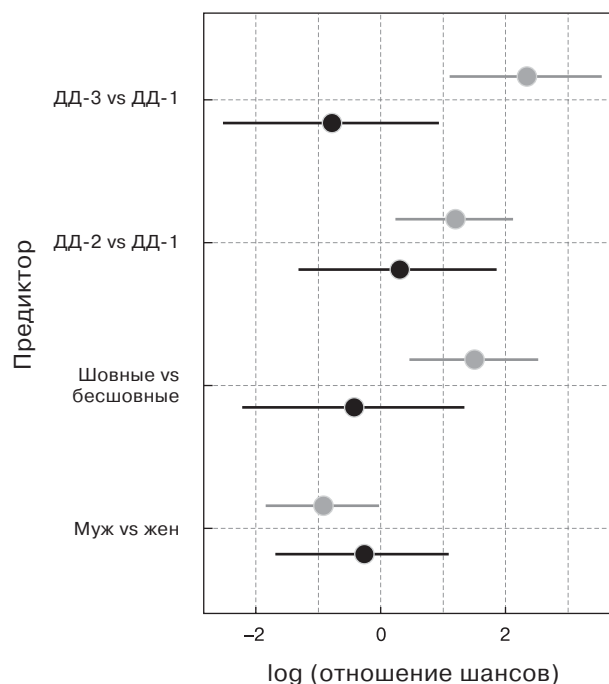
ДД-1 – диастолическая дисфункция ЛЖ 1-й степени до оперативного лечения, ДД-2 – диастолическая дисфункция ЛЖ 2-й степени до оперативного лечения, ДД-3 – диастолическая дисфункция ЛЖ 3-й степени до оперативного лечения.

Fig. 2. Comparison of risk factors for the development of POAF between the study groups based on the results of multivariate analysis.

Note. DD-1 – diastolic dysfunction of the LV grade 1 before surgical treatment, DD-2 – diastolic dysfunction of the LV grade 2 before surgical treatment, DD-3 – diastolic dysfunction of the LV grade 3 before surgical treatment.

Нарушение ритма в анамнезе
Heart rhythm disturbance in the anamnesis

- есть / yes
- нет / no



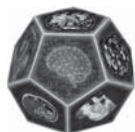


Таблица 6. Таблица вероятности наступления ПОФП по результатам многофакторного анализа

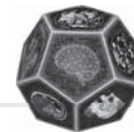
Table 6. Table of the probability of occurrence of POAF based on the results of multivariate analysis

Нарушение ритма в анамнезе Heart rhythm disturbance in the anamnesis	Степень диастолической дисфункции ЛЖ до операции The degree of diastolic dysfunction of the LV before surgery	Вид протеза Type of prosthesis	Пол Gender	Вероятность наступления ПОФП, %, ДИ Probability of occurrence of POAF, %, CI
Да / Yes	1	Бесшовные / Sutureless	Женский / Female	80.8 (43.2; 98.5)
Да / Yes	2	Бесшовные / Sutureless	Женский / Female	85.9 (59.7; 98.7)
Да / Yes	3	Бесшовные / Sutureless	Женский / Female	66.7 (21.4; 96.5)
Да / Yes	1	Бесшовные / Sutureless	Мужской / Male	75.6 (28.5; 98.2)
Да / Yes	2	Бесшовные / Sutureless	Мужской / Male	81.1 (43.5; 98.7)
Да / Yes	3	Бесшовные / Sutureless	Мужской / Male	60.7 (11.6; 96.3)
Да / Yes	1	Шовные / Suture	Женский / Female	74.1 (44; 94.2)
Да / Yes	2	Шовные / Suture	Женский / Female	79.6 (53.2; 96)
Да / Yes	3	Шовные / Suture	Женский / Female	78.2 (56.9; 92.9)
Да / Yes	1	Шовные / Suture	Мужской / Male	68.6 (36.7; 92.1)
Да / Yes	2	Шовные / Suture	Мужской / Male	74.8 (43.8; 94.8)
Да / Yes	3	Шовные / Suture	Мужской / Male	50.4 (15.6; 86.3)
Нет / No	1	Бесшовные / Sutureless	Женский / Female	7 (1.9; 16.6)
Нет / No	2	Бесшовные / Sutureless	Женский / Female	19.9 (7.8; 36.3)
Нет / No	3	Бесшовные / Sutureless	Женский / Female	44.3 (18.6; 71.3)
Нет / No	1	Бесшовные / Sutureless	Мужской / Male	3.2 (0.5; 9.5)
Нет / No	2	Бесшовные / Sutureless	Мужской / Male	9.4 (2.2; 23.3)
Нет / No	3	Бесшовные / Sutureless	Мужской / Male	24.9 (6.6; 54.5)
Нет / No	1	Шовные / Suture	Женский / Female	25.7 (11.6; 43.6)
Нет / No	2	Шовные / Suture	Женский / Female	53.7 (36; 71.7)
Нет / No	3	Шовные / Suture	Женский / Female	56.8 (22.2; 86.9)
Нет / No	1	Шовные / Suture	Мужской / Male	12.2 (4.1; 24.4)
Нет / No	2	Шовные / Suture	Мужской / Male	31.3 (17; 48)
Нет / No	3	Шовные / Suture	Мужской / Male	59.2 (34.5; 81.1)

тов, сглаживаются, а после 85 лет в структуре пациентов с ФП преобладают женщины, вероятно, в связи с большей продолжительностью жизни и наличием сопутствующей патологии, что согласуется с результатами нашего исследования. Следует отметить, что на основании доступных данных литературы пол сам по себе не является независимым предиктором развития послеоперационной пароксизмальной ФП у пациентов старше 70 лет после изолированного биопротезирования АоК [14-16].

В литературе описаны спорные данные о частоте возникновения ФП при сравнении использования шовных и бесшовных биологических протезов. Исследования в целом показывают сопоставимые

или значительно более низкие показатели возникновения ФП в группе пациентов, которым был имплантирован клапан Perceval. Это в большей степени связано с техникой операции, нежели с типом протеза. Сокращение интраоперационного времени и травматизации тканей при имплантации бесшовных протезов должно снижать воспалительный ответ и отек тканей, что в свою очередь может уменьшать частоту ФП. Однако в крупных рандомизированных исследованиях этот эффект не всегда обладает статистически значимым снижением именно показателя частоты возникновения ФП, так как на данное осложнение влияет множество факторов [17, 18]. У пациентов с тяжелым АС диастолическая



дисфункция ЛЖ действительно является одним из ключевых предикторов развития ранней ПОФП после биопротезирования АоК.

Известно, что АС приводит к увеличению постнагрузки, повышению давления в ЛЖ, возникновению и прогрессированию гипертрофии ЛЖ, фиброзу миокарда и, в конечном итоге, к систолической дисфункции, дилатации левого желудочка и сердечной недостаточности. Коррекция тяжелого АС с использованием кардиохирургических и эндоваскулярных методов ассоциирована в постоперационном периоде с благоприятными показателями внутрисердечной гемодинамики, снижением систолической нагрузки и последующим обратным структурно-функциональным ремоделированием ЛЖ [10, 19–21, 22]. Функция и размеры ЛП неразрывно связаны с ЛЖ, ДД ЛЖ в дооперационном периоде провоцирует электрофизиологическую нестабильность миокарда предсердий. ПОФП – это не кратковременное доброкачественное осложнение. Мета-анализы демонстрируют, что нарушение сердечного ритма после оперативного лечения увеличивает 30-дневную смертность пациентов в 1,5–2,0 раза, удлиняет их пребывание в стационаре и ассоциировано с трехкратным ростом частоты инсульта в раннем постоперационном периоде [23, 24].

Исходя из сказанного, изучение и определение эхокардиографических предикторов развития ПОФП – это важная клиническая задача. В отличие от интраоперационных факторов (время ишемии, тип кардиоплегии), эхокардиографические параметры просты в оценке, безопасны и широко доступны до операции. Понимание предикторов переводит проблему ПОФП из категории “непредвиденного осложнения” в категорию управляемого риска. Это позволит персонализировать периоперационное ведение и контролировать не только ранние, но и отдаленные исходы в данной группе пациентов.

Ограничения исследования. Ввиду того, что многоцентровое исследование проводилось на базе трех учреждений, в дооперационном периоде ЭхоКГ выполнялась врачами ультразвуковой диагностики соответствующих центров. Учитывая, что ультразвуковая диагностика является операторозависимым методом, нельзя исключить некоторую межисследовательскую разнородность полученных результатов ЭхоКГ.

Всегда существует риск искажения уровня заболеваемости ФП до операции ввиду анамнестического сбора данных, вероятности бессимптомного течения пароксизмов, короткого наблюдения в дооперационном периоде, несовершенства диагностики.

Заключение

Предоперационными факторами риска развития ФП в раннем послеоперационном периоде у лиц, перенесших хирургическую коррекцию тяжелого аортального стеноза и не имевших нарушения сердечного ритма в анамнезе дооперационно, являлись: диастолическая дисфункция левого желудочка 2-й и 3-й степени, женский пол и биопротезирование с использованием вшиваемых протезов. Наличие пароксизмальной ФП или частых предсердных экстрасистол в анамнезе до операции является основным фактором риска возникновения ПОФП.

Вероятность развития ФП в раннем послеоперационном периоде после замены АоК по поводу тяжелого АС значительно увеличивается при наличии перечисленных факторов риска.

Комплексная предоперационная эхокардиографическая оценка позволяет стратифицировать риск развития послеоперационной ФП. Это открывает дополнительные возможности для персонализированного подхода, направленной профилактики и улучшения исходов у пациентов после биопротезирования АоК.

Участие авторов

Тарасевич С.В. – концепция и дизайн исследования, проведение исследования, сбор и обработка данных, обзор публикаций по теме статьи, статистическая обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста, ответственность за целостность всех частей статьи.

Жерко О.М. – концепция и дизайн исследования, проведение исследования, обзор публикаций по теме статьи, анализ и интерпретация полученных данных, подготовка и редактирование текста, ответственность за целостность всех частей статьи, утверждение окончательного варианта статьи.

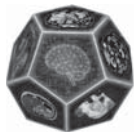
Галицкая С.С. – обзор публикаций по теме статьи, подготовка и редактирование текста, ответственность за целостность всех частей статьи, утверждение окончательного варианта статьи.

Крачек Д.И. – обзор публикаций по теме статьи, подготовка и редактирование текста, ответственность за целостность всех частей статьи, утверждение окончательного варианта статьи.

Красько О.В. – статистическая обработка данных, подготовка целостности всех частей статьи, утверждение окончательного варианта статьи, и редактирование текста, ответственность за целостность всех частей статьи, утверждение окончательного варианта статьи.

Authors' participation

Tarasevich S.V. – concept and design of the study, conducting research, collection and analysis of data, review of publications,



statistical analysis, analysis and interpretation of the obtained data, writing text, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Zherko O.M. – concept and design of the study, conducting research, review of publications, analysis and interpretation of the obtained data, text preparation and editing, responsibility for the integrity of all parts of the article, approval of the final version of the article.

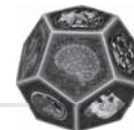
Galitskaya S.S. – review of publications, text preparation and editing, responsibility for the integrity of all parts of the article, approval of the final version of the article.

Krachak D.I. – review of publications, text preparation and editing, responsibility for the integrity of all parts of the article, approval of the final version of the article.

Krasko O.V. – statistical analysis, text preparation and editing, responsibility for the integrity of all parts of the article, approval of the final version of the article.

Список литературы [References]

1. Голицын С.П., Панченко Е.П., Миронов Н.Ю., Беляева М.М., Гаглоева Д.А., Елфимова Е.М., Кропачева Е.С., Лайович Л.Ю., Литвин А.Ю., Майков Е.Б., Уцумуева М.Д., Шахматова О.О. Евразийские клинические рекомендации по диагностике и лечению фибрилляции предсердий у взрослых (2025). *Евразийский кардиологический журнал*. 2025; 3: 6–77. <https://doi.org/10.38109/2225-1685-2025-3-6-77>
2. Golitsyn S.P., Panchenko E.P., Mironov N.Yu., et al. Eurasian clinical guidelines for the diagnosis and treatment of atrial fibrillation in adult patients (2025). *Eurasian Heart Journal*. 2025; 3: 6–77. <https://doi.org/10.38109/2225-1685-2025-3-6-77> (In Russian)
3. Joglar J.A., Chung M.K., Armbruster A.L. et al.; Peer Review Committee Members. 2023 ACC/AHA/ACCP/HRS Guideline for the Diagnosis and Management of Atrial Fibrillation: A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on Clinical Practice Guidelines. *Circulation*. 2024; 149 (1): e1–e156. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000001193>
4. Van Gelder I.C., Rienstra M., Bunting K.V. et al.; ESC Scientific Document Group. 2024 ESC Guidelines for the management of atrial fibrillation developed in collaboration with the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS). *Eur. Heart J.* 2024; 45 (36): 3314–3414. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehae176>
5. Kiser A.C. 2024 Literature Review of Postoperative Atrial Fibrillation: A Surgeon's Perspective. *J. Innov. Card. Rhythm. Manag.* 2025; 16 (1): 6154–6157. <https://doi.org/10.19102/icrm.2025.16017>
6. Nagueh S.F., Sanborn D.Y., Oh J.K. et al. Recommendations for the Evaluation of Left Ventricular Diastolic Function by Echocardiography and for Heart Failure With Preserved Ejection Fraction Diagnosis: An Update From the American Society of Echocardiography. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2025; 38 (7): 537–569. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2025.03.011>
7. Жерко О.М., Михайлов А.Н., Шкрбнева Э.И., Олиферко Н.П. Диагностическая эффективность нового метода определения диастолической дисфункции левого желудочка при сердечной недостаточности. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия медицинских наук*. 2021; 18 (3): 292–303. <https://doi.org/10.29235/1814-6023-2021-18-3-292-303>
8. Zherko O.M., Mikhailov A.N., Shkrebneva E.I., Oliferko N.P. Diagnostic efficiency of a new method for determining the left ventricular diastolic dysfunction in heart failure. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Medical series*. 2021; 18 (3): 292–303. <https://doi.org/10.29235/1814-6023-2021-18-3-292-303> (In Russian)
9. McDonagh T.A., Metra M., Adamo M. et al.; ESC Scientific Document Group. 2023 Focused Update of the 2021 ESC Guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure. *Eur. Heart J.* 2023; 44 (37): 3627–3639. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehad195>
10. Gaudino M., Di Franco A., Rong L.Q. et al. Postoperative atrial fibrillation: from mechanisms to treatment. *Eur. Heart J.* 2023; 44 (12): 1020–1039. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehad019>
11. Chatterjee S., Grant M.C., Hui D.S. et al. The Society of Thoracic Surgeons 2026 Clinical Practice Guidelines for the Prevention and Treatment of New-Onset Postoperative Atrial Fibrillation After Cardiac Surgery. *Ann. Thorac. Surg.* 2026; 122 (2): 255–277. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2026.04.002>
12. Тарасевич С.В., Жерко О.М., Крачак Д.И., Галицкая С.С. Отдаленные результаты коррекции тяжелого аортального стеноза с использованием кардиохирургических и эндоваскулярных методов по данным контроля лучевыми методами. *Медицинская визуализация*. 2025; 29 (4): 58–72. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1556>
13. Tarasevich S.V., Zherko O.M., Krachak D.I., Galitskaya S.S. Long-term results of correction of severe aortic stenosis using cardiac surgical and endovascular methods, as from radiologic control data. *Medical Visualization*. 2025; 29 (4): 58–72. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1556> (In Russian)
14. Bonanni F., Cacioli S., Berteotti M. et al. Left Ventricular Diastolic Dysfunction Predicts Global Longitudinal Strain Recovery after Surgical Aortic Valve Replacement. *Diagnostics (Basel)*. 2024; 14 (19): 2176. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14192176>
15. Suero O.R., Ali A.K., Barron L.R. et al. Postoperative atrial fibrillation (POAF) after cardiac surgery: clinical practice review. *J. Thorac. Dis.* 2024; 16 (2): 1503–1520. <https://doi.org/10.21037/jtd-23-1626>
16. Knez N., Kopjar T., Tokic T., Gasparovic H. Atrial Fibrillation Prediction Model Following Aortic Valve Replacement Surgery. *J. Cardiovasc. Dev. Dis.* 2025; 12 (2): 52. <https://doi.org/10.3390/jcdd12020052>
17. Fragão-Marques M., Mancio J., Oliveira J. et al. Gender Differences in Predictors and Long-Term Mortality of New-Onset Postoperative Atrial Fibrillation Following Isolated Aortic Valve Replacement Surgery. *Ann. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 2020; 26 (6): 342–351. <https://doi.org/10.5761/atcs.0a.19-00314>
18. Shin J., Andrews M., DeJean L. et al. Risk Factors Associated With Atrial Fibrillation in Elderly Patients.



- J. Clin. Med. Res.* 2023; 15 (3): 148–160.
<https://doi.org/10.14740/jocmr4884>
16. Faith M., Travis Q., Betteridge-LeBlanc S. Post-cardiac surgery atrial fibrillation and sex differences in clinical outcomes: a systematic review and meta-analysis. *Eur. Heart J. Open.* 2025; 5 (2): Art. oeaf033.
<https://doi.org/10.1093/ehjopen/oeaf033>
 17. Sohn S.H., Kim K.H., Kang Y. et al. Rapid deployment versus its conventional counterpart in aortic valve replacement: comparison of early hemodynamic outcomes. *J. Thorac. Dis.* 2023; 15 (7): 3673–3684.
<https://doi.org/10.21037/jtd-23-318>
 18. Aljalloud A., Moza A., Arias J.P. et al. Conventional vs. Sutureless Aortic Valve Bioprosthesis: Is Faster Better? *J. Cardiovasc. Dev. Dis.* 2023; 10 (7): 311.
<https://doi.org/10.3390/jcdd10070311>
 19. Praz F., Borger M.A., Lanz J. et al.; ESC/EACTS Scientific Document Group. 2025 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease. *Eur. Heart J.* 2025; 46 (44): 4635–4736.
<https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehaf194>
 20. Kassem J., Ghazal R., Fakhreddin O. et al. Assessment of Left Ventricular Global Longitudinal Strain Improvement Following Transcatheter Aortic Valve Replacement. *J. Cardiovasc. Echogr.* 2025; 35 (2): 129–135. https://doi.org/10.4103/jcecho.jcecho_99_24
 21. Lima M.R., Abecasis J., Santos R.R. et al. Prognostic impact of left ventricular reverse remodeling after surgical aortic valve replacement in severe aortic stenosis. *Sci. Rep.* 2025; 15 (1): Art. 26581.
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-12483-9>
 22. Тарасевич С.В., Жерко О.М., Галицкая С.С., Крачак Д.И., Комаровская Е.Г. Структурно-функциональное ремоделирование левого и правого желудочков после биопротезирования аортального клапана по поводу аортального стеноза. *Медицинские новости.* 2024; 9: 44–48.
 Tarasevich S.V., Zherko O.M., Galitskaya S.S. et al. Structural and functional remodeling of the left and right ventricles after bioprosthetic replacement of the aortic valve for aortic stenosis. *Medical News.* 2024; 9: 44–48. (In Russian)
 23. Awad A.K., Elbahloul M.A., Al-Omouh O. et al. Impact of postoperative atrial fibrillation (POAF) on outcomes after coronary artery bypass grafting: A meta-analysis of unique 247,270 patients from 50 studies. *Am. Heart J. Plus.* 2025; 59: 100621.
<https://doi.org/10.1016/j.ahjo.2025.100621>
 24. Woldendorp K., Farag J., Khadra S. et al. Postoperative Atrial Fibrillation After Cardiac Surgery: A Meta-Analysis. *Ann. Thorac. Surg.* 2021; 112 (6): 2084–2093.
<https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2020.10.055>

Для корреспонденции*: Тарасевич Светлана Владимировна – e-mail: tarasevich-svetlana@yandex.by

Тарасевич Светлана Владимировна – врач ультразвуковой диагностики отделения функциональной диагностики ГУ “Республиканский клинический медицинский центр” Управления делами Президента Республики Беларусь, Минск. <https://orcid.org/0009-0003-8552-1103>
Жерко Ольга Михайловна – доктор мед. наук, доцент, заведующая кафедрой ультразвуковой диагностики УО “Белорусский государственный медицинский университет”, Минск. <https://orcid.org/0000-0001-5752-0988>

Галицкая Светлана Сергеевна – канд. мед. наук, заместитель главного врача по лечебной части ГУ “Республиканский клинический медицинский центр” Управления делами Президента Республики Беларусь, Минск.

Крачак Дмитрий Иосифович – канд. мед. наук, заведующий отделом перспективных направлений высокотехнологичной медицинской помощи ГУ “Минский научно-практический центр хирургии, трансплантологии и гематологии”, Минск. <https://orcid.org/0000-0001-6770-4449>

Красько Ольга Владимировна – канд. мед. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, ГНУ “Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси”, Минск. <https://orcid.org/0000-0002-4150-282X>

Contact*: Svetlana V. Tarasevich – e-mail: tarasevich-svetlana@yandex.by

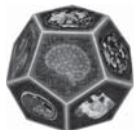
Svetlana V. Tarasevich – doctor of ultrasound diagnostics, department of functional diagnostics, Republican Clinical Medical Center of the Administration of the President of the Republic of Belarus, Minsk. <https://orcid.org/0009-0003-8552-1103>

Olga M. Zherko – Doct. of Sci. (Med.), Associate Professor, Head of the Department of Ultrasound Diagnostics, Belarusian State Medical University, Minsk. <https://orcid.org/0000-0001-5752-0988>

Svetlana S. Galitskaya – Cand. of Sci. (Med.), Deputy Chief Physician for the Medical Department, Republican Clinical Medical Center of the Administration of the President of the Republic of Belarus, Minsk.

Dmitry I. Krachak – Cand. of Sci. (Med.), Head of the Department of Prospective Areas of High-Tech Medical Care, Minsk Scientific and Practical Center for Surgery, Transplantology and Hematology, Minsk. <https://orcid.org/0000-0001-6770-4449>

Olga V. Krasko – Cand. of Sci. (Med.), Associate Professor, Lead Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk. <https://orcid.org/0000-0002-4150-282X>

**Брюшная полость и забрюшинное пространство**
Abdomen and retroperitoneumISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1706>

Методика выполнения чрескожной таргетной биопсии опухолей поджелудочной железы под ультразвуковым контролем с применением данных низкодозной перфузионной КТ в качестве навигации в режиме fusion (методические рекомендации)

© Джигкаева М.М.*, Лагкуева И.Д., Рагимов В.А., Нуднов Н.В., Солодкий В.А.

ФГБУ "Российский научный центр рентгенорадиологии" Минздрава России; 117997 Москва, ул. Профсоюзная, д. 86, Российская Федерация

Компьютерная томография с внутривенным контрастным усилением (КТ с в/в КУ) является "золотым стандартом" в диагностике образований поджелудочной железы. Дополнение стандартного протокола КТ с в/в КУ перфузионной программой существенно расширяет ее диагностические возможности, в частности в выявлении наиболее информативных структурных участков для забора морфологического материала на основании внутриопухолевых показателей кровотока. Практическое применение данных низкодозной перфузионной компьютерной томографии (ндПКТ) при чрескожной биопсии образований поджелудочной железы, подозрительных на злокачественный процесс, позволяет снизить число ложноотрицательных результатов. В статье представлены методика выполнения ндПКТ поджелудочной железы, постпроцессинговая обработка полученных данных, а также технические аспекты выполнения чрескожной таргетной биопсии образований поджелудочной железы с ориентацией на данные ндПКТ под ультразвуковым контролем в режиме fusion.

Цель исследования: методическое описание техники выполнения и параметрического анализа данных низкодозной перфузионной компьютерной томографии для последующего использования полученных данных в качестве навигации при чрескожной таргетной биопсии под ультразвуковым контролем в режиме fusion подозрительных на рак образований поджелудочной железы.

Материал и методы. В основу методических рекомендаций вошли результаты собственных исследований, выполненных 34 пациентам с образованиями поджелудочной железы, находившимся в стационарном отделении хирургических методов лечения и противоопухолевой лекарственной терапии абдоминальной онкологии с койками абдоминальной ФГБУ "РНЦРР" Минздрава России в период 2023–2026 гг.

Ключевые слова: рак поджелудочной железы; чрескожная таргетная биопсия; ультразвуковое исследование; низкодозная перфузионная компьютерная томография

Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

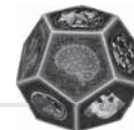
Соблюдение прав пациентов и правил биоэтики. Данная тема рассмотрена и утверждена на независимом этическом комитете ФГБУ "РНЦРР" МЗ РФ.

Для цитирования: Джигкаева М.М., Лагкуева И.Д., Рагимов В.А., Нуднов Н.В., Солодкий В.А. Методика выполнения чрескожной таргетной биопсии опухолей поджелудочной железы под ультразвуковым контролем с применением данных низкодозной перфузионной КТ в качестве навигации в режиме fusion (методические рекомендации). *Медицинская визуализация*. 2026; 30 (3): 64–73. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1706>

Поступила в редакцию: 24.09.2026.

Принята к печати: 26.09.2026.

Опубликована online: 30.09.2026.



A technique for performing ultrasound-guided percutaneous targeted biopsy of pancreatic tumors using low-dose perfusion CT data for fusion-mode navigation (methodological recommendations)

© Marina M. Dzhigkaeva*, Irina D. Lagkueva, Vadim A. Ragimov, Nikolay V. Nudnov, Vladimir A. Solodkiy

Russian Scientific Center of Roentgenoradiology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 86, Profsoyusnaya str., Moscow 117997, Russian Federation

Computed tomography with intravenous contrast enhancement (CT with IV-CE) is the “gold standard” for diagnosing pancreatic lesions. Supplementing standard CT with IV-CE with a perfusion scanning protocol significantly enhances the diagnostic capabilities of imaging techniques in identifying the most informative intratumoral biopsy sites based on blood flow measurements, which in turn reduces the number of false-negative results in suspected pancreatic malignancy. This article presents the methodology for performing NDPCT of pancreatic lesions, post-processing of the obtained results, as well as the technical aspects of performing percutaneous targeted biopsy of pancreatic lesions based on NDPCT data under ultrasound control in fusion mode.

Objective: A detailed description of the methodology for performing and parametrically analyzing the results of low-dose perfusion computed tomography for the subsequent use of the obtained data for navigation during percutaneous targeted biopsy under ultrasound control in fusion mode of pancreatic tumors suspicious for cancer.

Materials and methods. These methodological guidelines are based on the results of original research conducted on 34 patients with pancreatic lesions who were treated between 2023 and 2026 at the Department of Surgical Treatment and Antitumor Drug Therapy for Abdominal Malignancies (incorporating abdominal surgery beds) of the Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies (RNCRR) of the Ministry of Health of Russia.

Keywords: pancreatic cancer; percutaneous targeted biopsy; ultrasound; low-dose perfusion computed tomography

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

Compliance with patient rights and bioethics guidelines. This topic was reviewed and approved by the independent ethics committee of the Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies (RSCRST) of the Ministry of Health of the Russian Federation.

For citation: Dzhigkaeva M.M., Lagkueva I.D., Ragimov V.A., Nudnov N.V. Solodkiy V.A. A technique for performing ultrasound-guided percutaneous targeted biopsy of pancreatic tumors using low-dose perfusion CT data for fusion-mode navigation (methodological recommendations). *Medical Visualization*. 2026; 30 (3): 64–73. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1706>

Received: 24.09.2026.

Accepted for publication: 26.09.2026.

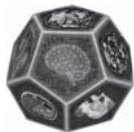
Published online: 30.09.2026.

Введение

Рак поджелудочной железы является 6-й по значимости в мире причиной смертности от онкологических заболеваний [1]. Своевременная диагностика от выявления образований по данным лучевых методов исследования до установления морфологического диагноза на основании изучения материала, полученного во время пункционной биопсии, является одним из определяющих факторов терапии и, следовательно, продолжительности жизни больных со злокачественными новообразованиями поджелудочной железы [2, 3].

Тенденция к увеличению частоты заболеваемости раком поджелудочной железы по данным мировой статистики на сегодняшний день делает крайне актуальным поиск способов, позволяющих улучшить эффективность малоинвазивного установле-

ния характера новообразований в сжатые сроки для своевременного начала лечения и улучшения прогноза заболевания [4–6]. Среди таких способов совершенствования морфологической верификации опухолей целесообразен инновационный подход – применение данных низкодозной перфузионной компьютерной томографии (ндПКТ) при биопсии. Возможности ндПКТ в оценке внутриопухолевых различий микроциркуляции можно рассмотреть в качестве перспективного и прогрессивного метода навигации при планировании чрескожной таргетной биопсии опухолей поджелудочной железы, гетерогенность и структурные особенности которых являются основной причиной получения ложных результатов при биопсии и индуцируют выполнение повторного хирургического вмешательства [7–10].



Навигационные возможности данных ндПКТ при чрескожной таргетной биопсии образований поджелудочной железы под ультразвуковым контролем в режиме fusion в настоящее время остаются неизученными.

Цель исследования: определена актуальность и необходимость изучения комбинированного подхода для повышения результативности чрескожной таргетной биопсии образований поджелудочной железы.

Показания к выполнению ндПКТ поджелудочной железы:

1. ндПКТ рекомендуется к практическому применению у пациентов с впервые выявленными образованиями поджелудочной железы, подозрительными на рак, которым планируется выполнение чрескожной биопсии (ЧБ) под ультразвуковым контролем для установления морфологического диагноза.

2. ндПКТ рекомендуется к практическому применению у пациентов с предшествующими безуспешными попытками биопсии образований поджелудочной железы эндоскопическим, чрескожным или интраоперационным доступом.

Подготовка к исследованию и укладка

Перед выполнением ндПКТ пациенты подписывают добровольное информированное согласие. Определяются абсолютные и относительные противопоказания к внутривенному введению йодсодержащих контрастных средств. К абсолютным противопоказаниям относятся тяжелые аллергические реакции на йодсодержащие контрастные средства в анамнезе и манифестный тиреотоксикоз, к относительным – снижение функции почек, бронхиальная астма в стадии обострения или в тяжелой форме, беременность, сахарный диабет, печеночная, почечная, сердечная недостаточность в стадии декомпенсации.

ндПКТ рекомендуется выполнять натощак, при этом достаточно ограничения приема пищи за 2 ч до исследования для предотвращения вазовагальной реакции. Необходима оценка уровня креатинина по биохимическому анализу крови сроком не позднее 1 мес до исследования и определение скорости клубочковой фильтрации, которая должна быть выше 30 мл/мин/1,73 м² (согласно актуальным рекомендациям Комитета по безопасности контрастных средств Европейского общества урогенитальной радиологии (ESUR Contrast Media Safety Committee)). У всех пациентов, вошедших в наше исследование, этот показатель был выше 40 мл/мин/1,73 м².

Перед выполнением исследования рекомендуется провести разъяснительную беседу с пациентом

о необходимости неподвижного положения, спокойного и неглубокого дыхания, следует предупредить о челночных движениях при сканировании и об ощущениях во время введения контрастного средства.

Для введения контрастного средства пациенту устанавливается периферический катетер в кубитальную вену диаметром не менее 20 G с последующим подключением к системе инъектора. Исследование проводится с заведенными за голову руками с целью исключения артефактов при сканировании.

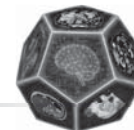
Выполнение исследования ндПКТ

Представлен подробный анализ ндПКТ-сканирования, выполненного нами на 64-срезовом компьютерном томографе General Electric "Optima CT 660".

Для сканирования используется специальный протокол ндПКТ (0,5 мЗв). На первом этапе после получения локализаторов в коронарной и сагитальной плоскостях стандартно выполняется нативное сканирование толщиной срезов 5 мм. В последующем выделяется область сканирования по перфузионной программе таким образом, чтобы образование поджелудочной железы находилось в центре поля сканирования. Для внутривенного (в/в) контрастирования препараты с концентрацией йода 350–370 мг/мл рекомендуется вводить в объеме 40–50 мл со средней скоростью введения 4,0–5,0 мл/с, с последующим болюсным введением 30–50 мл физиологического раствора. Запуск многократного сканирования зоны интереса осуществляется одновременно с введением контрастного средства. Общее время динамического исследования составляет 60 с, из которых на сканирование приходится 53 с, на задержку – 7 с. Для перфузионной программы сканирования используются следующие параметры: 32 серии, время сканирования 1 серии – 1,7 с, интервал между сериями – 1 с, время оборота трубки – 0,5 с, питч – 1,375. Сканирование осуществляется в спиральном челночном режиме (Helical Shuttle) с охватом зоны сканирования 12 см в краниокаудальном направлении. Для снижения лучевой нагрузки модифицируются параметры сканирования: напряжение трубки – 80 кВ, сила тока на трубке – 220 мА. Лучевая нагрузка высчитывается индивидуально для каждого пациента по формуле Total Exam DLP x 0,014.

Постпроцессинговая обработка и анализ ндПКТ

Представлено подробное изложение постпроцессинговой обработки данных ндПКТ на рабочей станции Advantage Workstation VolumeShare 7 "General Electric".



Полученные перфузионные серии с толщиной срезов 5 мм (“сырые данные”) реконструируются в 1,25 мм в программе Retro Recon. Далее реконструированные серии рекомендуется загрузить в приложение динамической записи на рабочей станции врача с целью минимизации нежелательных двигательных артефактов, что в последующем значительно облегчит работу и повысит качество анализируемых изображений.

Для получения цветowych карт с возможностью последующего анализа количественных показателей используется специальный программный пакет 4D-перфузии для поджелудочной железы. Прежде всего определяются зоны интереса (ROI, Region of Interest) с позиционированием на брюшную аорту в качестве референсной точки, необходимой для построения математической модели, а также в нескольких точках опухолевого образования для определения количественных параметров микроциркуляции в выбранных зонах. К стандартным анализируемым количественным параметрам относятся:

1) объем крови – blood volume (BV, мл/100 г). С помощью BV рассчитывается объем крови в миллилитрах на 100 г ткани;

2) скорость кровотока – blood flow (BF, мл/100 г/мин). С помощью BF рассчитывается количество крови в миллилитрах, которое проходит через 100 г ткани в минуту;

3) среднее время прохождения контрастного препарата – mean transit time (MTT, с) – среднее время прохождения крови в секундах через сосудистое русло;

4) время достижения пика – time to peak (TTP, с), отражает время в секундах от начала введения до достижения максимальной концентрации контрастного препарата в ткани;

5) капиллярная проницаемость – permeability surface-area product (PS, мл/100 г × мин) – коэффициент проницаемости сосудистой стенки капилляров в миллилитрах на 100 г ткани в минуту.

С целью улучшения визуализационных характеристик перфузионных карт рекомендуется проводить коррекцию верхней границы цветового окна просмотра последовательно для каждого параметра, исходя из средних значений: для анализа BV верхняя граница составляет около 80, для BF – 200, для MTT – 15, для TTP – 25, для PS – 100. При этом важно контролировать, чтобы нижняя граница окна имела нулевое значение, так как без коррекции она может выходить за пределы диапазона цветовой шкалы, т.е. в отрицательные значения. Анализ полученных изображений осуществляется в цветowych картах: rainbow functional для BV и PS, puh_thallium для BF, inv_rainbow для MTT и TTP.

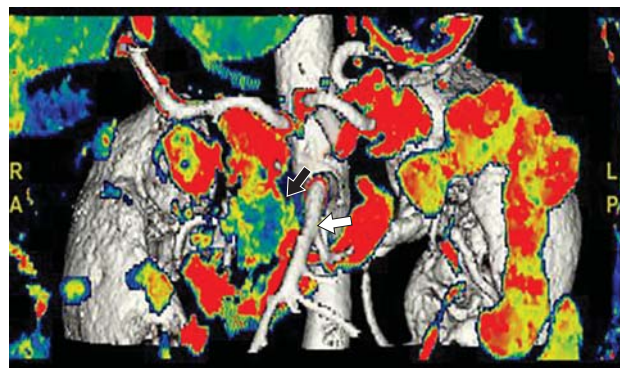


Рис. 1. Fusion объемной реконструкции (VR) и перфузионной карты MIS в коронарной плоскости. Граница опухоли представлена желто-зеленым цветом (черная стрелка), чревный ствол в режиме VR (белая стрелка).

Fig. 1. Fusion of volume rendering (VR) and the MIS perfusion map in the coronal plane. The tumor margin is shown in yellow-green (black arrow), and the celiac trunk in VR mode (white arrow).

Использование перфузионных карт с полуколичественными параметрами средней скорости возрастания плотности (Mean Slope of Increase – MSI) и пиковой интенсивности усиления (Positive Enh. Integral – PEI) позволяет оценить соотношение опухоли и сосудов, облегчая выявление сосудистой инвазии. Данные показатели отражают динамику накопления контрастного вещества в тканях и измеряются в единицах Хаунсфилда (HU). Пиковая интенсивность усиления (PEI) отражает максимальную плотность (пик) контрастного вещества в ткани после его внутривенного введения, вычитая исходную плотность, а средняя скорость достижения пика от момента начала контрастирования называется средней скоростью возрастания плотности (MIS).

Также программный пакет 4D-перфузии для поджелудочной железы позволяет комбинировать цветowych карты с объемной реконструкцией (Volume Rendering – VR) и получить модифицированное изображение (рис. 1).

Для корректности параметрических измерений в зоне интереса рекомендуется настроить параметры ROI в ручном режиме с автоматическим дублированием на всех цветowych картах. ROI устанавливается в нескольких точках образования, селекция которых осуществляется на основании предварительного анализа, ориентируясь на цветowych шкалы. В нашем исследовании диаметр ROI был равен 5 мм. Для участков с высокими значениями сосудистой проницаемости, объема и скорости кровотока характерен красно-оранжевый градиент. Для высоких значений показателей среднего времени

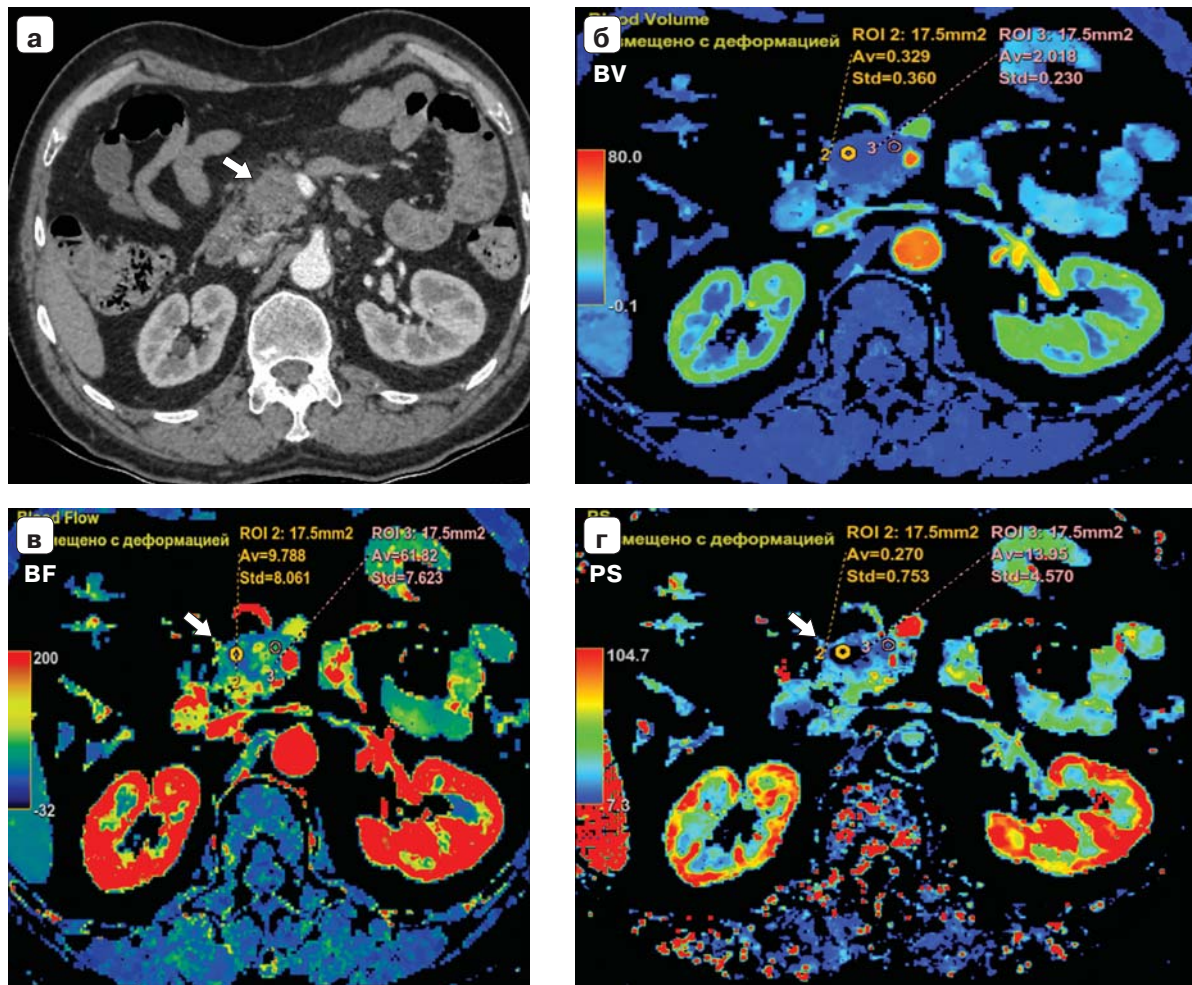
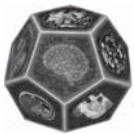


Рис. 2. Серия снимков, демонстрирующая гетерогенность периферической части опухоли поджелудочной железы, разницу по кровотоку (объем, скорость, сосудистая проницаемость) в пределах периферической части.
а – КТ. Артериальная фаза. Аксиальная плоскость. Относительно однородная гиповаскулярная опухоль в головке поджелудочной железы (стрелка);
б – цветовая карта. Аксиальная плоскость. Количественные показатели BV в разных точках периферической зоны (ROI 2 – в правых отделах опухоли, ROI 3 – в левых отделах опухоли) протоковой аденокарциномы в головке поджелудочной железы, которые демонстрируют значимые отличия;
в – цветовая карта. Аксиальная плоскость. Количественные показатели BF в разных точках периферической зоны (ROI 2 – в правых отделах опухоли, ROI 3 – в левых отделах опухоли) протоковой аденокарциномы в головке поджелудочной железы, которые демонстрируют значимые отличия;
г – цветовая карта. Аксиальная плоскость. Количественные показатели PS в разных точках периферической зоны (ROI 2 – в правых отделах опухоли, ROI 3 – в левых отделах опухоли) протоковой аденокарциномы в головке поджелудочной железы, которые демонстрируют значимые отличия.

Fig. 2. A series of images demonstrating the heterogeneity of the peripheral part of a pancreatic tumor and differences in blood flow parameters (volume, velocity, vascular permeability) within that peripheral region.
а – CT. Arterial phase. Axial plane. A relatively homogeneous hypovascular tumor in the head of the pancreas (arrow);
б – color map. Axial plane. Quantitative blood volume (BV) values at different points within the peripheral zone (ROI 2 – right aspect of the tumor; ROI 3 – left aspect of the tumor) of a ductal adenocarcinoma in the pancreatic head, demonstrating significant differences;
в – color map. Axial plane. Quantitative BF values at different points in the peripheral zone (ROI 2 – in the right aspect of the tumor, ROI 3 – in the left aspect of the tumor) of a ductal adenocarcinoma in the pancreatic head, demonstrating significant differences;
г – color map. Axial plane. Quantitative PS values at different points in the peripheral zone (ROI 2 – in the right aspect of the tumor, ROI 3 – in the left aspect of the tumor) of a ductal adenocarcinoma in the pancreatic head, demonstrating significant differences.

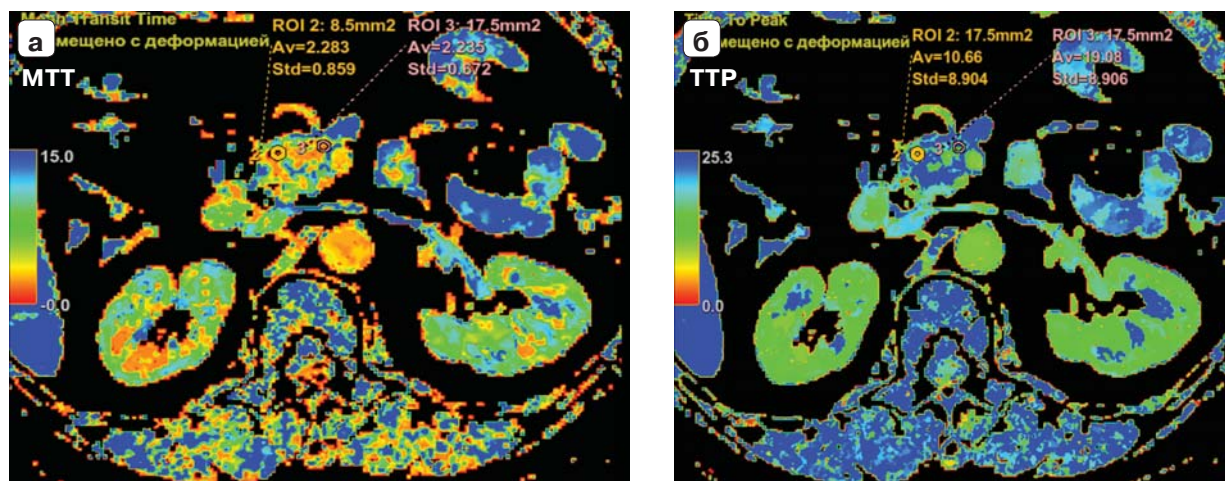
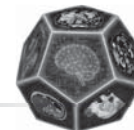


Рис. 3. Цветовые карты перфузии, демонстрирующие гетерогенность периферической части опухоли поджелудочной железы, разницу временных параметров (среднее время прохождения контрастного препарата, время достижения пика) в пределах периферической части.

а – цветовая карта. Аксиальная плоскость. Количественные показатели МТТ в разных точках периферической зоны (ROI 2 – в правых отделах опухоли, ROI 3 – в левых отделах опухоли) протоковой аденокарциномы в головке поджелудочной железы, которые демонстрируют значимые отличия;

б – цветовая карта. Аксиальная плоскость. Количественные показатели ТТР в разных точках периферической зоны (ROI 2 – в правых отделах опухоли, ROI 3 – в левых отделах опухоли) протоковой аденокарциномы в головке поджелудочной железы, которые демонстрируют значимые отличия.

Fig. 3. Perfusion color maps demonstrating the heterogeneity of the pancreatic tumor periphery and differences in temporal parameters (mean transit time, time to peak) within the peripheral region.

a – color map. Axial plane. Quantitative MTT values at different points within the peripheral zone (ROI 2 in the right aspect of the tumor, ROI 3 in the left aspect) of a ductal adenocarcinoma in the pancreatic head, demonstrating significant differences;

b – color map. Axial plane. Quantitative TTP values at different points within the peripheral zone (ROI 2 – in the right sections of the tumor, ROI 3 – in the left sections of the tumor) of a ductal adenocarcinoma in the pancreatic head, demonstrating significant differences.

прохождения контрастного средства и для времени достижения пика характерен сине-зеленый градиент. После расчета методом деконволюции количественные значения перфузии в зоне интереса отображаются в виде сводной таблицы с абсолютными числовыми значениями и со средним отклонением.

Преимущество ндПКТ заключается в возможности выявлять различия по кровотоку в структуре, как правило, гетерогенной протоковой аденокарциномы, демонстрирующей относительную гомогенность при стандартной КТ с в/в КУ. Известно, что наиболее низкие показатели кровотока наблюдаются в центральных отделах опухолей, представленных некротическим компонентом, в то время как для периферических отделов значения перфузионных показателей выше. Отталкиваясь от данного факта, хирурги постулируют забор морфологического материала из периферических отделов, избегая центр опухоли. Однако и для периферической

части протоковой аденокарциномы характерно неравномерное распределение, что также может приводить к получению неинформативного биоптата при морфологическом исследовании (рис. 2, 3).

В результате анализа определяется таргетная для биопсии область на перфузионных картах и извлекается одна серия ндПКТ с последующим экспортом на DVD-носитель.

Технология fusion – совмещение перфузионной серии ндПКТ и УЗИ

Представлено подробное изложение этапов синхронизации перфузионной серии ндПКТ и УЗИ на ультразвуковом аппарате. В нашей работе ультразвуковые исследования выполнялись на аппарате “Esaote MyLab Twice”.

Наиболее информативная перфузионная серия и цветовые карты импортируются в ультразвуковой аппарат. Далее на перфузионной серии следует

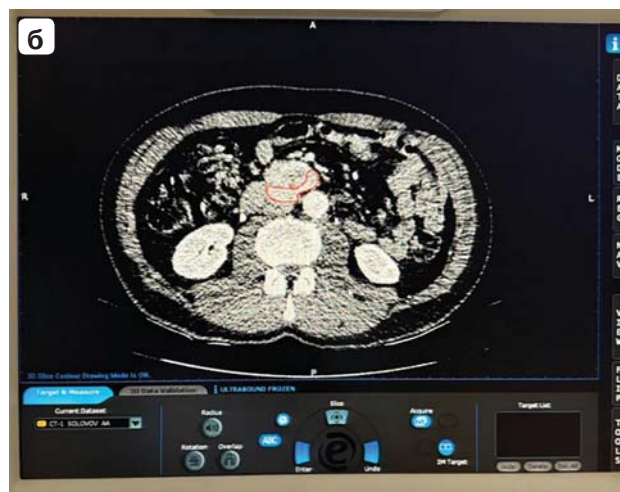
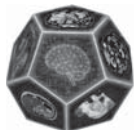


Рис. 4. Цветовая карта (а) и перфузионная серия (б), импортированные в ультразвуковой аппарат “Esaote MyLab Twice”. Выделенный участок на перфузионной серии по данным цветовых карт для последующей таргетной биопсии опухоли под ультразвуковым контролем в режиме fusion (б).

Fig. 4. Color map (a) and perfusion series (b) imported into the Esaote MyLab Twice ultrasound system. Region of interest on the perfusion series identified using color map data for subsequent ultrasound-guided targeted tumor biopsy in fusion mode (b).

выделить таргетный участок в соответствии с данными загруженных цветовых карт и оконтурить (рис. 4).

Следующим этапом после определения маркированной внутриопухолевой “мишени” на ндПКТ выполняется УЗИ с установкой датчика перпендикулярно телу пациента. Предварительно на стойке рядом с кушеткой устанавливается излучатель магнитного поля, который необходим для создания возможности объемной навигации. Специальный магнитный сенсор (приемник) крепится на ультразвуковой датчик, что даст возможность определения положения датчика относительно тела пациента. Затем с помощью интеллектуальной программы ультразвукового аппарата осуществляется синхронизация загруженных данных ндПКТ с ультразвуковым изображением в режиме реального времени – технология fusion. Ориентирами для топографического совмещения в аксиальной плоскости ндПКТ и ультразвуковых изображений являются сосудистые структуры (воротная вена, чревный ствол, верхняя брыжеечная артерия). Для максимального сопоставления изображений необходим выбор двух и более ориентиров. После совмещения ндПКТ и УЗИ любое движение датчика синхронно будет менять срез КТ-изображения. Процесс объединения двух диагностических модальностей на ульт-

развуковом аппарате занимает менее 1 мин. В нашем исследовании среднее время синхронизации изображений составило 46 с.

Чрескожная таргетная биопсия под ультразвуковым контролем с применением данных низкодозной перфузионной КТ в качестве навигации в режиме fusion

Следующим этапом является непосредственно чрескожная таргетная биопсия образования поджелудочной железы. Предварительно исключаются противопоказания к малоинвазивному хирургическому вмешательству на основании результатов лабораторных и инструментальных методов исследования.

Чрескожная биопсия опухолей поджелудочной железы выполняется под местной анестезией 20,0 0,25% раствором новокаина – (или лидокаина 20 мг/мл, 4 мл) в положении пациента лежа на столе томографа непосредственно сразу после выполнения ндПКТ без изменения положения тела под ультразвуковым контролем. В зависимости от локализации опухоли определяется наиболее оптимальный доступ: передний срединный (наиболее частый), левосторонний, правосторонний, задний. Для выполнения трепан-биопсии нами использова-

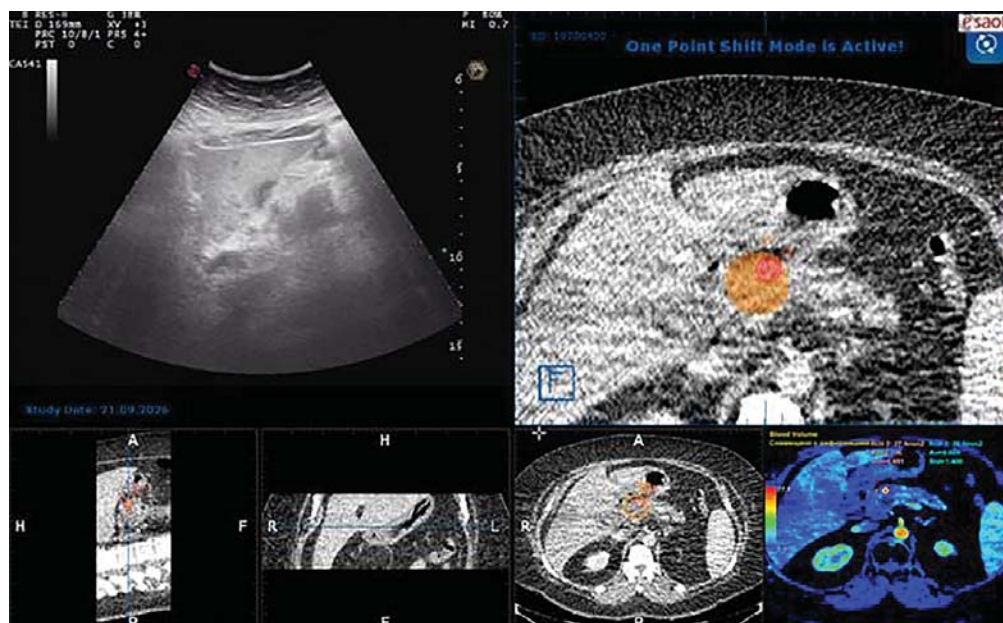
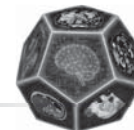


Рис. 5. Этап синхронизации ндПКТ и УЗИ (fusion) на экране ультразвукового аппарата “Esaote MyLab Twice” перед чрескожной таргетной биопсией протоковой аденокарциномы головки поджелудочной железы. По данным УЗИ в головке поджелудочной железы визуализируется гипоехогенная гомогенная опухоль. На перфузионном исследовании опухоль маркирована оранжевым цветом, таргетный участок для биопсии обозначен красной меткой и соответствует “мишени” на цветовой карте.

Fig. 5. Synchronization stage (fusion imaging) of CEUS and ultrasound on the screen of the Esaote MyLab Twice ultrasound system prior to percutaneous targeted biopsy of a ductal adenocarcinoma in the head of the pancreas. Ultrasound imaging reveals a hypoechoic, homogeneous tumor in the pancreatic head. On the perfusion study, the tumor is highlighted in orange, and the target site for biopsy is marked in red, corresponding to the “target” on the color map.



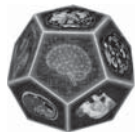
Рис. 6. ндПКТ и УЗИ в режиме fusion при чрескожной таргетной биопсии протоковой аденокарциномы в головке поджелудочной железы. Участок для таргетной биопсии опухоли обозначен красной меткой.

Fig. 6. CE-EUS and fusion ultrasound during percutaneous targeted biopsy of ductal adenocarcinoma in the pancreatic head. The target area for the tumor biopsy is marked in red.

лись автоматическая система многоразового пользования пистолет-игла “Bard Magnum”, специальные иглы диаметром 16–18 G и длиной от 100 до 200 мм. Выбор длины иглы зависит от глубины залегания опухоли. Дистальный конец иглы устанавливается по наружному контуру опухоли в проекции выбранной при ндПКТ “мишени” с расчетом, что игла во время “выстрела” выйдет вглубь заданной траектории на 15 или 20 мм. Выполняется таргетная

биопсия образования под ультразвуковым контролем. Забор материала выполняется при задержке дыхания на вдохе или выдохе в зависимости от ультразвуковой визуализации (рис. 5, 6).

Полученный “столбик” ткани помещается в раствор формалина. Все гистологические исследования биопсийного материала в нашей работе были выполнены в плановом порядке в патологоанатомическом отделении ФГБУ “РНЦРР” Минздрава России.



По окончании биопсии рекомендуется выполнение УЗИ органов брюшной полости для исключения осложнений. Назначается постельный режим, голод и холод на область биопсии на 2–3 ч. Общее время чрескожной таргетной биопсии составляет от 10 до 15 мин. В процессе и после выполнения малоинвазивного хирургического вмешательства ни у одного пациента, вошедшего в наше исследование, осложнений выявлено не было.

В результате проведенного исследования комбинированный подход, включающий в себя ндПКТ и УЗИ в режиме fusion при ЧБ образований поджелудочной железы, позволил установить диагноз у 32 из 34 пациентов при однократном заборе материала в процессе одного малоинвазивного вмешательства. В 2 случаях установка морфологического диагноза потребовала выполнения повторной ЧБ. В 33 случаях из 34 морфологически подтверждена протоковая аденокарцинома различной степени дифференцировки, в 1 случае – коллоидный рак.

Таким образом, комбинированный подход позволяет повысить эффективность малоинвазивного хирургического вмешательства, при котором данные ндПКТ задают координаты в структуре опухоли для выполнения биопсии, а УЗИ позволяет выбрать оптимальный маршрут до целевой точки и в режиме реального времени осуществлять контроль за ходом иглы до выбранной “мишени”.

Вклад авторов

Джигкаева М.М. – сбор и обработка информации, написание текста.

Лагкуева И.Д., Рагимов В.А. – правка и редактирование статьи.

Нуднов Н.В., Солодкий В.А. – концепция и дизайн исследования. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Authors' participation

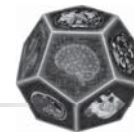
M.M. Dzhygkaeva – data collection and processing, manuscript drafting.

I.D. Lagkueva, V.A. Ragimov – manuscript revision and editing.

N.V. Nudnov, V.A. Solodkiy – study conception and design. All authors confirm that they meet the ICMJE authorship criteria (all authors made substantial contributions to the conception, research and analysis, and manuscript preparation, and read and approved the final version prior to publication).

Список литературы [References]

1. Sung H., Filho A.M., Laversanne M. et al. Global cancer statistics 2024: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 34 cancers in 186 countries. *CA Cancer J. Clin.* 2026; 76 (4): e70090. <https://doi.org/10.3322/caac.70090>
2. Lilly A.C., Astsaturon I., Golemis E.A. Intrapancreatic fat, pancreatitis, and pancreatic cancer. *Cell. Mol. Life Sci.* 2023;80 (8): 206. <https://doi.org/10.1007/s00018-023-04855-z>
3. Cai J., Chen H., Lu M. et al. Advances in the epidemiology of pancreatic cancer: Trends, risk factors, screening, and prognosis. *Cancer Lett.* 2021; 520: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2021.06.027>
4. May M.S., Park W., O'Reilly E.M. Treating Pancreatic Ductal Adenocarcinoma: The Targeted Revolution is Here. *Drugs.* 2026; 86 (4): 507–532. <https://doi.org/10.1007/s40265-026-02295-0>
5. Ohtsuka T., Fernandez-Del Castillo C., Furukawa T. et al. International evidence-based Kyoto guidelines for the management of intraductal papillary mucinous neoplasm of the pancreas. *Pancreatology.* 2024; 24 (2): 255–270. <https://doi.org/10.1016/j.pan.2023.12.009>
6. Нуднов Н.В. и др. Нейроэндокринные опухоли желудка и поджелудочной железы: диагностические возможности радиомикрии, проблемы и пути их решения. *Digital Diagnostics.* 2024. 5 (4): 712–724. <https://doi.org/10.17816/DD629345>
Nudnov N.V., Shakhvalieva E.S.-A., Karelidze D.G., Borisov A.A., Ivannikov M.E. Neuroendocrine tumors of stomach and pancreas: diagnostic potential of radiomics, issues, and solutions. *Digital Diagnostics.* 2024; 5 (4): 712–724. <https://doi.org/10.17816/DD629345> (In Russian)
7. Perik T.H., van Genugten E.A.J., Aarntzen E.H.J.G. et al. Quantitative CT perfusion imaging in patients with pancreatic cancer: a systematic review. *Abdom. Radiol (NY).* 2022; 47 (9): 3101–3117. <https://doi.org/10.1007/s00261-021-03190-w>
8. O'Malley R.B., Cox D., Soloff E.V. et al. CT perfusion as a potential biomarker for pancreatic ductal adenocarcinoma during routine staging and restaging. *Abdom. Radiol. (NY).* 2022; 47 (11): 3770–3781. <https://doi.org/10.1007/s00261-022-03638-7>
9. Abe T., Nakamura M., Morizane C. et al. Clinical Practice Guidelines for Pancreatic Cancer 2025 From the Japan Pancreas Society: A Synopsis. *Pancreas.* 2026; 55 (1): e120–e133. <https://doi.org/10.1097/MPA.0000000000002600>
10. Bryant J.M., Ruffolo L., Soares K. et al. Evolving concepts in adjuvant/neoadjuvant therapy for resectable pancreas cancer. *J. Clin. Invest.* 2025; 135 (14): e191944. <https://doi.org/10.1172/JCI191944>



Для корреспонденции*: Джигкаева Марина Михайловна – dzhigkaeva.mm@mail.ru

Джигкаева Марина Михайловна – врач-рентгенолог отделения рентгеновской диагностики с кабинетами рентгеновской и магнитно-резонансной компьютерной томографии ФГБУ “Российский научный центр рентгенорадиологии” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-0731-921X>

Лагкуева Ирина Джабраиловна – канд. мед. наук, заведующая отделением рентгеновской диагностики с кабинетами рентгеновской и магнитно-резонансной компьютерной томографии ФГБУ “Российский научный центр рентгенорадиологии” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-9732-7170>

Рагимов Вадим Абдурагимович – канд. мед. наук, научный сотрудник лаборатории хирургических технологий в онкологии научно-исследовательского отдела хирургии, урологии, гинекологии и инвазивных технологий в онкологии ФГБУ “Российский научный центр рентгенорадиологии” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-5002-3521>

Нуднов Николай Васильевич – доктор мед. наук, профессор, заместитель директора по научной работе ФГБУ “Российский научный центр рентгенорадиологии” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-5994-0468>

Солодкий Владимир Алексеевич – академик РАН, доктор мед. наук, профессор, заслуженный врач РФ, директор ФГБУ “Российский научный центр рентгенорадиологии” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-1641-6452>

Contact*: Marina M. Dzhigkaeva – dzhigkaeva.mm@mail.ru

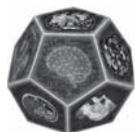
Marina M. Dzhigkaeva – Radiologist, Department of X-Ray Diagnostics with X-Ray and Magnetic Resonance Computed Tomography Rooms, Russian Scientific Center of Roentgenoradiology, Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-0731-921X>

Irina D. Lagkueva – Cand. of Sci. (Med.), Head of Department of X-Ray Diagnostics with X-Ray and Magnetic Resonance Computed Tomography Rooms, Russian Scientific Center of Roentgenoradiology, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-9732-7170>

Vadim A. Ragimov – Cand. of Sci. (Med.), Laboratory of Surgical Technologies in Oncology, Research Department of Surgery, Urology, Gynecology and Invasive Technologies in Oncology, Russian Scientific Center of Roentgenoradiology, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-5002-3521>

Nikolay V. Nudnov – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Deputy Director for Scientific Work, Russian Scientific Center of Roentgenoradiology, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-5994-0468>

Vladimir A. Solodkiy – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doct. of Sci. (Med.), Professor, Honored Doctor of the Russian Federation, Director of the Russian Scientific Center of Roentgenoradiology, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-1641-6452>



Двухуровневая система дифференциальной диагностики солидных новообразований почек на основе мультипараметрического ультразвукового и томографического анализа: разработка и внутренняя валидация критериев

© Сажина А.А.^{1*}, Васильева И.В.^{1,2}, Ратников В.А.^{3,4}, Удалов Ю.Д.¹, Степанова Ю.А.⁵

¹ ФГБУ "Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна" ФМБА России; 123098 Москва, ул. Маршала Новикова, д. 23, Российская Федерация

² ФГАОУ ВО "Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова" Минздрава России; 117997 Москва, ул. Островитянова, д. 1, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный университет"; 199034 Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9, Российская Федерация

⁴ ФГБУ "Федеральный научно-клинический центр инфекционных болезней Федерального медико-биологического агентства"; 197022 Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 9Г, Российская Федерация

⁵ ФГБУ "Национальный медицинский исследовательский центр хирургии им. А.В. Вишневского" Минздрава России; 117997 Москва, ул. Большая Серпуховская, д. 27, Российская Федерация

Дифференциальная диагностика солидных опухолей почек на этапе стандартного лучевого поиска сопряжена с высокой частотой перекрытия визуализационных признаков, формирующих "серые зоны" между доброкачественными и злокачественными гистотипами.

Цель исследования: разработать и валидировать двухуровневую систему дифференциальной диагностики солидных опухолей почек на основе интеграции данных литературы и анализа собственного клинического материала.

Материал и методы. На основе систематического анализа метаданных 42 профильных публикаций (12 000 пациентов) были сформулированы первичные критерии модели. Клиническую апробацию алгоритма провели на собственной выборке из 395 пациентов, включавшей светлоклеточный почечно-клеточный рак (скПКР; n = 258), ангиомиолипому (АМЛ; n = 35), папиллярный рак (пПКР; n = 32), онкоцитомы (n = 30), хромофобный рак (хПКР; n = 28) и контрольную группу плотных кист Bosniak IIF/III (n = 12). Всем больным выполняли УЗИ с ЦДК, мультифазную МСКТ и мультипараметрическую МРТ (мпМРТ). Математический анализ осуществляли методом бинарной логистической регрессии и ROC-анализа с процедурой бутстреп-валидации (B = 1000).

Результаты. Сформирована двухкомпонентная кодовая матрица калькулятора, позволяющая дискретно разделять этапы диагностики во времени. Первый уровень (УЗИ+МСКТ) обеспечивает автоматическую сегрегацию до 85% классических паттернов. При обнаружении признаков "серой зоны" сессия архивируется под ID пациента до выполнения экспертного II уровня (мпМРТ). Дифференциация атипичных опухолей на экспертном этапе реализована за счет интеграции функциональных МР-маркеров и расчета критических точек отсечения измеряемого коэффициента диффузии для полярных гистотипов. Общая диагностическая точность итоговой двухуровневой модели на проверочной выборке составила 91,3%.

Заключение. Внедрение разработанной дискретной двухуровневой системы позволяет прецизионно верифицировать атипичные новообразования почек (мжАМЛ, гиповаскулярный рак, онкоцитомы) на дооперационном этапе, минимизируя частоту инвазивных биопсий и неоправданных хирургических вмешательств.

Ключевые слова: солидные опухоли почки; почечно-клеточный рак; онкоцитомы; ангиомиолипома; ультразвуковое исследование; цветное доплеровское картирование; мультиспиральная компьютерная томография; мультипараметрическая МРТ; измеряемый коэффициент диффузии; диагностический калькулятор

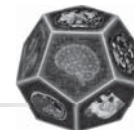
Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Сажина А.А., Васильева И.В., Ратников В.А., Удалов Ю.Д., Степанова Ю.А. Двухуровневая система дифференциальной диагностики солидных новообразований почек на основе мультипараметрического ультразвукового и томографического анализа: разработка и внутренняя валидация критериев. *Медицинская визуализация*. 2026; 30 (3): 74–89. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1665>

Поступила в редакцию: 15.06.2026.

Принята к печати: 31.08.2026.

Опубликована online: 30.09.2026.



A two-level system for differential diagnosis solid renal tumors based on multiparametric ultrasonic and tomographic analysis: development and internal validation of criteria

© Anna A. Sazhina^{1*}, Irina V. Vasilieva^{1,2}, Vyacheslav A. Ratnikov^{3,4}, Yuri D. Udalov¹, Yulia A. Stepanova⁵

¹ A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of the Federal Medical and Biological Agency of Russia; 23, Marshal Novikov str., Moscow 123098, Russian Federation

² Pirogov Russian National Research Medical University; 1, Ostrivnyanova str., Moscow 117997, Russian Federation

³ Saint Petersburg University; 7/9, University quay, Saint Petersburg 199034, Russian Federation

⁴ Federal Scientific and Clinical Center for Infectious Diseases of the Federal Medical and Biological Agency; 9G, Professor Popov str., Saint Petersburg 197022, Russian Federation

⁵ A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 27, Bol'shaya Serpukhovskaya str., Moscow 117997, Russian Federation

Differential diagnosis of solid renal tumors at the stage of standard radiological search is associated with a high frequency of overlapping imaging features, forming "gray zones" between benign and malignant histotypes.

Objective: to develop and validate a two-tiered differential diagnosis system for solid renal tumors based on the integration of literature data and analysis of our own clinical data (395 patients).

Materials and Methods. Based on a systematic analysis of metadata from 42 specialized publications (12,000 patients), the primary criteria of the model were formulated. Clinical testing of the algorithm was performed on our own sample of 395 patients, including clear cell carcinoma (ccRCC; n = 258), angiomyolipomas (AML; n = 35), papillary carcinoma (pRCC; n = 32), oncocytomas (n = 30), chromophobe carcinoma (chRCC; n = 28) and a control group of Bosniak IIF/III dense cysts (n = 12). All patients underwent ultrasound with color Doppler imaging, multiphase MSCT and multiparametric MRI (mpMRI). Mathematical analysis was performed using binary logistic regression and ROC analysis with bootstrap validation (B = 1000).

Results. A two-component code matrix for the calculator was developed, allowing for discrete separation of diagnostic stages over time. The first level (ultrasound + MSCT) automatically segregates up to 85% of classic patterns. If signs of a "gray zone" are detected, the session is archived under a patient ID until the second level (mpMRI) is performed. Differentiation of atypical tumors at the expert stage is achieved through the integration of functional MRI markers and the calculation of critical cutoff points for the measured diffusion coefficient (MDC) for polar histotypes. The overall diagnostic accuracy of the final two-level model on the validation set was 91.3%.

Conclusion. The two-level discrete approach minimizes diagnostic errors in "gray areas" of imaging, optimizes patient routing, and reduces the incidence of unnecessary surgical interventions.

Keywords: solid renal masses; renal cell carcinoma; renal oncocytoma; angiomyolipoma; ultrasound; Color Doppler Imaging; multidetector computed tomography; apparent multiparametric MRI; diffusion coefficient; diagnostic calculator

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Sazhina A.A., Vasilyeva I.V., Ratnikov V.A., Udalov Yu.D., Stepanova Yu.A. A two-level system for differential diagnosis solid renal tumors based on multiparametric ultrasonic and tomographic analysis: development and internal validation of criteria. *Medical Visualization*. 2026; 30 (3): 74–89. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1665>

Received: 15.06.2026.

Accepted for publication: 31.08.2026.

Published online: 30.09.2026.

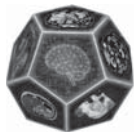
Введение

Заболеваемость раком почки стабильно растет, что обусловлено повсеместным использованием лучевых методов исследования и, как следствие, частым обнаружением инциденталом, большинство из которых представляют собой злокачественные опухоли. Согласно мировой статистике, рак почки – один из лидеров среди урологических онкозаболеваний и занимает 14-е место в общей структуре онкологии с числом новых случаев около 400 000 в год [1, 2]. Необходимо учитывать, что до 20–30% выявленных новообразований являются доброкаче-

ственными, что подчеркивает критическую важность точной дифференциальной диагностики [3].

Развитие лучевой диагностики не снимает сложностей в дифференциации новообразований почек. Причиной тому служит перекрест радиологических симптомов доброкачественных и злокачественных опухолей, а также значительный полиморфизм их визуальной картины [4, 5].

В повседневной практике урологов и онкологов большинство пациентов обращаются на первичный прием, уже имея результаты ультразвукового исследования (УЗИ) и мультиспиральной компьютер-



ной томографии (МСКТ) с внутривенным контрастированием. Эти методы являются фундаментом первичной верификации и стадирования объемных образований паренхимы почек.

Однако данных УЗИ и МСКТ далеко не всегда достаточно для принятия окончательного решения о тактике лечения. В 15–20% клинических ситуаций лучевая картина носит атипичный, “пограничный” характер. МСКТ-артефакты жесткости излучения, отсутствие макроскопического жира или идентичные графики перфузии у гистологически полярных опухолей формируют диагностические ловушки. Возникает феномен “серой зоны”, грозящий либо неоправданной радикальной нефрэктомией при доброкачественном процессе (онкоцитоме, маложирная ангиомиолипома), либо недооценкой степени злокачественности агрессивного рака [6–12].

Мы выдвигаем гипотезу о том, что при обнаружении признаков “серой зоны” на этапе первичного анализа при МСКТ и УЗИ пациента целесообразно направлять на магнитно-резонансную томографию (МРТ) с использованием специализированных функциональных протоколов. Из этой концепции логически вытекает ключевое прикладное свойство системы: алгоритм и калькулятор могут использоваться дискретно, по частям. Врач полностью завершает первый этап (УЗИ и МСКТ) постановкой диагноза или в случае выявления “серой зоны” отпускает пациента на дообследование. При повторном приеме, когда больной возвращается с результатами МРТ, калькулятор открывается на втором уровне, аккумулирует новые параметры и выдает финальное заключение. Такой подход минимизирует временные издержки и полностью соответствует реальной логике амбулаторно-поликлинического приема.

Цель исследования: разработать и валидировать двухуровневую систему дифференциальной диагностики солидных опухолей почек на основе интеграции данных литературы и анализа собственного клинического материала.

Материал и методы

Методология систематического анализа литературы. Разработка критериев первого (скринингового) и второго (экспертного) уровней прогностической модели базировалась на предварительном масштабном анализе метаданных отечественной и зарубежной периодики за десятилетний период (2016–2026 гг.). Процесс селекции научных источников осуществлялся в соответствии с четырехэтапной дискретной схемой фильтрации.

Этап 1. Первичный информационный поиск. Чтобы обеспечить максимальный охват публикаций по теме исследования, использовалась расширенная сетка поисковых дескрипторов (включая их

комбинации через логические операторы AND/OR): “renal cell carcinoma” (почечно-клеточный рак), “papillary renal cell carcinoma” (папиллярный рак почки), “chromophobe renal cell cancer” (хромофобный рак), “renal oncocytoma” (онкоцитоме), “angio-myolipoma” (ангиомиолипома), “hyperdense renal cysts” (плотные кисты почек), “Bosniak classification 2019”, “ultrasonography” (УЗИ), “computed tomography” (КТ/МСКТ), “magnetic resonance imaging” (МРТ) и “diffusion-weighted MRI” [13]. По сформированной сетке расширенных поисковых дескрипторов в цифровых репозиториях PubMed/MEDLINE, eLIBRARY и Кокрановской библиотеке было суммарно идентифицировано 814 публикаций.

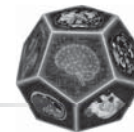
Этап 2. Скрининг заголовков и аннотаций. На данном этапе проводилась экспресс-оценка релевантности найденных материалов. Из первичного пула были исключены 542 статьи, как не соответствующие базовой предметной области и дизайну планируемого исследования. Из анализа выводились работы, посвященные исключительно молекулярно-генетическим маркерам, протоколам таргетной или системной химиотерапии, а также хирургическим техникам резекций без детального фокуса на предоперационную лучевую визуализацию. Для дальнейшего полнотекстового анализа было оставлено 272 публикации.

Этап 3. Экспертная оценка полнотекстовых версий. К оставшемуся массиву статей были применены жесткие методологические фильтры включения и исключения:

- Критерии включения: в финальный пул отбирались только оригинальные клинические исследования, содержащие собственные статистические данные авторов, либо крупные систематические обзоры и метаанализы, в которых семиотические параметры лучевых модальностей (УЗИ с ЦДК, мультифазной МСКТ и мпМРТ) обязательно сопоставлялись с результатами верифицированного послеоперационного гистологического или пункционного иммуногистохимического исследования.

- Критерии исключения: из аналитической базы полностью исключались единичные клинические наблюдения (case reports), краткие обзоры серий наблюдений объемом менее 10 пациентов, тезисы конференций, а также работы, лишенные объективного морфологического подтверждения гистотипа. Из-за несоответствия указанным критериям на данном этапе было отсеяно 230 публикаций.

Этап 4. Формирование финального пула метаданных. В итоговый статистический и семиотический анализ для выработки весовых коэффициентов калькулятора вошло 42 публикации. Данный массив включает в себя 8 крупномасштабных метаанализов и 34 оригинальных клинических исследо-



вания с совокупным объемом верифицированных наблюдений более 12 000 пациентов. (Полученные из этого пула данные по перфузии, денситометрии и коэффициентам диффузии послужили основой для калибровки шкал разработанного программного обеспечения.)

Анализ обобщенных данных литературы выявил фундаментальную диагностическую проблему: папиллярный почечно-клеточный рак (пПКР) в 25–30% случаев практически невозможно надежно отличить от доброкачественных плотных кист (белковых, геморрагических) категории Bosniak IIF/III по данным МСКТ. Оба процесса имеют нативную плотность выше паренхимы (30–50 ед.Н) и демонстрируют пограничный прирост плотности (+10...+15 ед.Н) из-за артефактов жесткости излучения. По этой причине в дизайн нашего собственного клинического исследования была обоснованно введена контрольная группа плотных кист.

Характеристика собственной выборки пациентов. Основу исследования составили ретроспективные и проспективные данные 395 пациентов с солидными новообразованиями почек и сложными кистами, проходивших обследование и лечение на базе нашей клиники (табл. 1). Все включенные в исследование образования имели обязательную послеоперационную гистологическую верификацию или верификацию по данным чрескожной пункционной биопсии либо стабильного динамического

наблюдения (для кист Bosniak IIF) сроком не менее 24 мес. Строго на II (экспертном) уровне для оценки разделяющей способности МР-субтракции и DWI в отношении гиповаскулярного папиллярного рака в анализ включили 12 пациентов с плотными кистами. (Данная подвыборка включает исключительно пациентов из МСКТ-“серой зоны” (нативная плотность >35 ед.Н, ложный артериальный прирост +10 ... +18 ед.Н.) Пациенты с простыми кистами Bosniak I-II в исследование не включались. Небольшой объем этой группы обусловлен жесткостью отбора, но ввиду высокой величины эффекта (Effect Size) при оценке диффузии между жидкостью и тканью объем выборки статистически достаточен для получения высокодостоверных различий ($p < 0,001$).

Технические параметры оборудования и протоколы сканирования

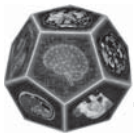
Ультразвуковое исследование. Выполнялось на аппаратах экспертного класса конвексными датчиками 3,5–5 МГц. Протокол включал серошкальное сканирование (В-режим) и обязательное цветное доплеровское картирование (ЦДК).

Мультиспиральная компьютерная томография. Проводилась на 64- и 128-срезовых томографах. Исследование выполнялось в мультифазном режиме: нативная, кортико-медуллярная (артериальная) – 25–30 с, паренхиматозная (венозная) – 70–80 с, выделительная (отсроченная) фаза – 5–7 мин. Контрастный препарат вводился болюсно со скоро-

Таблица 1. Окончательная структура выборки пациентов (n=395)

Table 1. Final composition of the patient cohort (n = 395)

Биологический профиль Biological profile	Клинико-гистологический тип Clinical and histological type	n	Доля от общей выборки, % Percentage of the total cohort, %
Доброкачественные процессы Benign lesions	Ангиомиолипома Angiomyolipoma	35	8.9%
	Онкоцитома Oncocytoma	30	7.6%
	Плотные кисты (Bosniak IIF/III) – КОНТРОЛЬ Hyperdense cysts (Bosniak IIF/III) – CONTROL	12	3.0%
Злокачественные опухоли Malignant tumors	Светлоклеточный рак Clear cell renal cell carcinoma	258	65.3%
	Папиллярный рак Papillary renal cell carcinoma	32	8.1%
	Хромофобный рак Chromophobe renal cell carcinoma	28	7.1%
ВСЕГО TOTAL		395	100%



стью 4,0–4,5 мл/с из расчета 1,5 мл на кг массы тела. Толщина среза составляла 1,0–1,25 мм.

Магнитно-резонансная томография. Выполнялось на высокопольных томографах с индукцией магнитного поля 1,5 и 3,0 Тл с использованием многоканальной поверхностной катушки для тела. Обязательный протокол включал: T2-ВИ в аксиальной и коронарной проекциях, T1-ВИ “в фазе” (In-Phase) и “в противофазе” (Out-of-Phase), диффузионно-взвешенные изображения (DWI) с b-факторами 0, 500 и 1000 с/мм² с построением карт измеряемого коэффициента диффузии (ИКД), а также динамическое контрастное усиление с применением программ математической субтракции (Subtraction). Обработка данных выполнялась на рабочих станциях Vitrea и Centricity.

Статистический анализ и валидация. Статистическая обработка данных выполнялась в пакете программ SPSS Statistics v.26 и среды RStudio. Для оценки разделяющей способности модели проводился ROC-анализ с расчетом площади под кривой (AUC), чувствительности (Se) и специфичности (Sp). Внутренняя валидация осуществлялась методом случайного расщепления общей выборки на обучающую ($n = 296$) и проверочную ($n = 99$) подвыборки в соотношении 75:25, а также бутстреп-методом (Bootstrapping, $B = 1000$ репликаций).

Внешняя валидация на данном этапе намеренно не проводилась, так как собственная выборка полностью репрезентативна общемировой структуре распространенности гистотипов, а математический аппарат бутстреп надежен и компенсирует моноцентрический сбор данных.

Результаты исследования

Модально-ориентированная структура лучевых критериев. Для исключения субъективизма параметры оценки были строго привязаны к физическим и гемодинамическим свойствам опухолевой ткани.

Ультразвуковая диагностика (УЗИ и ЦДК). Выбор параметров оценки на этапе УЗИ (нативная эхоструктура, дорсальные акустические эффекты и характер васкуляризации при ЦДК) обусловлен их связью с макроскопическим строением опухолей. Эхоструктура отражает степень однородности ткани, акустические эффекты служат маркерами физической плотности, а ЦДК визуализирует архитектуру сформированного опухолевого сосудистого русла (табл. 2).

Мультиспиральная компьютерная томография. Выбор МСКТ-параметров (нативная плотность, артериальный прирост и венозно-отсроченная динамика) основан на принципах количественной денситометрии. Нативная плотность выявляет тканевые субстраты (макрожир, геморрагии), артериальный

прирост (Δ ед.Н) отражает объемную скорость регионарного кровотока, а скорость вымывания характеризует структуру опухолевого интерстиция (табл. 3).

Магнитно-резонансная томография (мультипараметрическая МРТ). МРТ как экспертный уровень требует отбора параметров, сочетающих контрастность мягких тканей с функциональным анализом клеточного микроокружения (T1/T2-взвешенный сигнал, специфические МР-треки и параметры DWI/ИКД). Характер T2-сигнала зависит от биохимического состава, специфические треки улавливают минимальную перфузию или ультрамалые объемы липидов, а DWI/ИКД оценивают истинную клеточную плотность и ядерно-цитоплазматическое соотношение (табл. 4).

Метод кодирования параметров и структура калькулятора модели. Для обеспечения математической стабильности калькулятора и устранения субъективного фактора при интерпретации изображений все качественные визуальные признаки на первом и втором уровнях системы переведены в стандартизированную цифровую кодую матрицу.

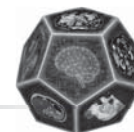
Интерфейс калькулятора предполагает два типа ввода данных:

- Прямой ввод абсолютных физических величин – для шкал, имеющих числовое выражение на рабочей станции (нативная плотность в ед.Н, прирост плотности Δ ед.Н, значение ИКД).
- Выбор рангового цифрового кода (от 0 до 3) – для качественных параметров УЗИ, ЦДК и МРТ. Каждому коду соответствует жесткое описание визуального паттерна, закрепленное в рекомендациях ESUR [14].

Полная схема кодирования признаков для интеграции в программный алгоритм калькулятора представлена в табл. 5.

Такой способ кодирования позволяет программе преобразовывать качественные наблюдения врача в стандартизированный цифровой вектор. Далее этот вектор умножается на весовые коэффициенты, полученные нами в ходе логистического регрессионного анализа на обучающей выборке, и формирует итоговую вероятность гистотипа.

Дискретный алгоритм функционирования калькулятора и математическое обоснование пороговых значений. Логика работы калькулятора построена на дискретном (разделенном во времени) вводе данных, что позволяет сопоставлять результаты первичного приема с данными отсроченного МР-дообследования. Применение алгоритма разделено на две независимые технологические сессии, привязанные к этапам диагностического маршрута пациента (табл. 6).



Внутренняя валидация модели. Матрица весовых коэффициентов логистической регрессии калькулятора. Математический расчет вероятности (P) конкретного гистологического типа опухоли в калькуляторе реализуется через классическое уравнение логистической регрессии:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

где z – прогностический индекс, рассчитываемый как сумма произведений кодов признаков на их весовые коэффициенты плюс константа (B_0):

$$z = B_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_n \cdot X_n$$

Значения весовых коэффициентов (β) для критических диагностических модулей калькулятора представлены в табл. 7.

Математические параметры ROC-анализа и пороговые значения ИКД. Для настройки экспертного уровня калькулятора (визит 2) был проведен ROC-анализ на обучающей выборке ($n = 296$). Математическое моделирование позволило установить жесткие точки отсечения (*cut-off*) для измеряемого ИКД, разделяющие опухоли в критических клинических ситуациях (табл. 8).

Таблица 2. Ультразвуковые критерии солидных новообразований почек

Table 2. Ultrasound criteria for solid renal tumors

Гистологический тип опухоли Histological tumor type	Нативная эхоструктура и контуры Baseline echotexture and margins	Дорсальные акустические эффекты Posterior acoustic features	Характер васкуляризации при ЦДК Vascularization pattern on CDI
Ангиомиолипома Angiomyolipoma	Выраженная гомогенная гиперэхогенность, четкие ровные границы Marked homogeneous hyperechogenicity; well-defined, smooth margins	Наличие четкой акустической тени позади образования Distinct posterior acoustic shadowing	Скудный локальный кровоток или полное отсутствие сигналов Sparse focal blood flow or complete absence of Doppler signals
Онкоцитомы Oncocytoma	Изоэхогенная или умеренно гипоехогенная; четкие контуры; в 10% случаев – гипоехогенный центр Isoechoic or moderately hypoechoic; well-defined margins; a hypoechoic center in 10% of cases	Отсутствуют None	Патогномоничный симптом “спиц колеса” (радиарный ход) Pathognomonic spoke-wheel sign (radial vascular pattern)
Светлоклеточный рак Clear cell renal cell carcinoma	Выраженная гетерогенность (зоны некроза, кисты); неровные, бугристые контуры Marked heterogeneity (areas of necrosis and cystic change); irregular, lobulated margins	Наличие зон акустического усиления за жидкостными полостями Posterior acoustic enhancement behind fluid-containing areas	Интенсивный хаотичный гиперваскулярный кровоток, шунты Intense chaotic hypervascular flow with shunts
Папиллярный рак Papillary renal cell carcinoma	Стойкая однородная гипоехогенность; четкие, правильные контуры Persistent homogeneous hypoechogenicity; well-defined, regular margins	Отсутствуют (имитация простой кисты) None (may mimic a simple cyst)	Аваскулярный профиль или единичные периферические сигналы Avascular pattern or isolated peripheral signals
Хромофобный рак Chromophobe renal cell carcinoma	Крупное, преимущественно гомогенное изо- или гипоехогенное образование Large, predominantly homogeneous iso- or hypoechoic lesion	Отсутствуют None	Умеренная смешанная (пери- и интратуморальная) васкуляризация Moderate mixed (peri- and intratumoral) vascularization

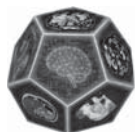


Таблица 3. МСКТ-критерии солидных новообразований почек

Table 3. Multidetector CT criteria for solid renal tumors

Гистологический тип опухоли Histological tumor type	Нативная плотность, ед.Н Unenhanced attenuation, HU	Прирост плотности в артериальную фазу, Δ ед. Н Arterial-phase attenuation increase, Δ HU	Динамика контрастирования в венозную и отсроченную фазы Enhancement pattern in the venous and delayed phases
Ангиомиолипома Angiomyolipoma	Наличие патогномоничных фокусов жира (от -10 до -100 ед.Н) Pathognomonic macroscopic fat foci (-10 to -100 HU)	Интенсивный прирост только в сосудистых локусах Marked increase confined to vascular foci	Вымывание из сосудистых зон; участки жира плотность не меняют Washout from vascular areas; attenuation of fat-containing areas remains unchanged
Онкоцитома Oncocytoma	Изоденсная или умеренно гиперденсная структура Isoattenuating or moderately hyperattenuating structure	Интенсивное гомогенное накопление контраста Intense homogeneous contrast enhancement	Равномерное вымывание; визуализация гиподенсного звездчатого рубца Homogeneous washout; visualization of a hypodense stellate scar
Светлоклеточный рак Clear cell renal cell carcinoma	Гетерогенная (понижена в зонах некроза, возможны кальцинаты) Heterogeneous (lower attenuation in necrotic areas; calcifications may be present)	Взрывное накопление (пик усиления, $\Delta > 100$ ед.Н) Brisk enhancement (peak enhancement, $\Delta > 100$ HU)	Стремительное и выраженное вымывание контраста Rapid and pronounced contrast washout
Папиллярный рак Papillary renal cell carcinoma	Гомогенная структура, плотность в пределах $20-40$ ед.Н Homogeneous structure, attenuation $20-40$ HU	Слабое контрастирование (строго в диапазоне $\Delta 10-20$ ед.Н) Weak enhancement (strictly within $\Delta 10-20$ HU)	Медленное, постепенное нарастание плотности к отсроченной фазе Slow, progressive increase in attenuation toward the delayed phase
Хромофобный рак Chromophobe renal cell carcinoma	Преимущественно гомогенная средняя плотность Predominantly homogeneous intermediate attenuation	Умеренное однородное контрастирование ($\Delta 30-50$ ед.Н) Moderate homogeneous enhancement ($\Delta 30-50$ HU)	Стабильное плато; симптом сегментарного инвертированного усиления Stable plateau; segmental enhancement inversion sign

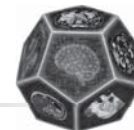


Таблица 4. МРТ-критерии солидных новообразований почек

Table 4. MRI criteria for solid renal tumors

Гистологический тип опухоли Histological tumor type	Характер сигнала на T1-ВИ и T2-ВИ Signal characteristics on T1WI and T2WI	Специфический функциональный МР-трек Specific functional MRI sequence	Поведение опухоли на DWI и параметры ИКД DWI behavior and ADC parameters
Ангиомиолипома Angiomyolipoma	Гиперинтенсивный сигнал на стандартных T1- и T2-ВИ Hyperintense signal on conventional T1WI and T2WI	Падение сигнала на последовательности Out-of-Phase (микрожир) Signal drop on out-of-phase images (microscopic fat)	Свободная диффузия в жировых матриксах; артефакты на DWI Unrestricted diffusion in the fatty matrix; DWI artifacts
Онкоцитома Oncocytoma	T2-гипоинтенсивная капсула, T2-гиперинтенсивный рубец T2-hypointense capsule; T2-hyperintense scar	Отсутствие падения сигнала на жироподавлении No signal loss with fat suppression	Относительно свободная диффузия (высокий ИКД $>1,4 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$) Relatively unrestricted diffusion (high ADC $>1,4 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$)
Светлоклеточный рак Clear cell renal cell carcinoma	Выраженная мозаичность и гетерогенность сигнала на T2-ВИ Marked mosaic pattern and T2 signal heterogeneity	Локальные очаги падения сигнала на Out-of-Phase (холестерин) Focal signal drop on out-of-phase images (intracellular lipid/cholesterol)	Умеренное гетерогенное ограничение диффузии воды Moderate heterogeneous restriction of water diffusion
Папиллярный рак Papillary renal cell carcinoma	Стойкий однородный гипоинтенсивный сигнал на T2-ВИ Persistent homogeneous T2 hypointensity	Интенсивное свечение тканевого компонента на Subtraction Marked enhancement of the tissue component on subtraction images	Выраженное ограничение диффузии молекул воды Pronounced restriction of water diffusion
Хромофобный рак Chromophobe renal cell carcinoma	Преимущественно изо-/гипоинтенсивный T2-сигнал; T2-гипоинтенсивный рубец Predominantly iso-/hypointense T2 signal; T2-hypointense scar	Отсутствие признаков интратуморального жира No evidence of intratumoral fat	Экстремальное ограничение диффузии (низкий ИКД $\leq 1,22 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$) Marked diffusion restriction (low ADC $\leq 1,22 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$)

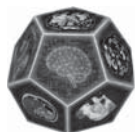


Таблица 5. Матрица кодирования и форматы ввода диагностических параметров в калькулятор модели

Table 5. Coding matrix and input formats for the model diagnostic parameters

Лучевая модальность / Уровень Imaging modality / Level	Оцениваемый параметр Parameter assessed	Формат ввода в калькулятор Calculator input format	Описание кодированных значений (значение-код) Description of coded values (value-code)
УРОВЕНЬ I: УЗИ LEVEL I: US	Эхогенность Echogenicity	Ранговый код Ordinal code	Анэхогенное – 0 Гипоэхогенное – 1 Изоэхогенное – 2 Гиперэхогенное – 3 Anechoic – 0 Hypoechoic – 1 Isoechoic – 2 Hyperechoic – 3
	Контуры Margins	Ранговый код Ordinal code	Ровные, четкие – 0 Неровные, бугристые / Нечеткие – 1 Smooth, well defined – 0 Irregular, lobulated and/or ill defined – 1
УРОВЕНЬ I: ЦДК LEVEL I: CDI	Тип архитектуры кровотока Flow architecture	Ранговый код Ordinal code	Аваскулярный профиль – 0 Скудный локальный/периферический – 1 Радиарный (тип “спиц колеса”) – 2 Хаотичный гипervasкулярный – 3 Avascular pattern – 0 Sparse focal/peripheral flow – 1 Radial (spoke-wheel) pattern – 2 Chaotic hypervascular pattern – 3
УРОВЕНЬ I: МСКТ LEVEL I: MDCT	Нативная плотность Unenhanced attenuation	Абсолютное число Numeric value	Ввод точного значения с МСКТ-станции в ед.Н Enter the exact value from the CT workstation, HU
	Артериальный прирост Arterial enhancement	Абсолютное число Numeric value	Расчетная величина Δ в ед.Н (Артериальная фаза минус Нативная) Calculated Δ HU (arterial phase minus unenhanced phase)
	Динамика вымывания (Wash-out) Washout kinetics	Ранговый код Ordinal code	Медленное постепенное нарастание – 0 Стабильное плато – 1 Стремительное вымывание контраста – 2 Slow progressive enhancement – 0 Stable plateau – 1 Rapid contrast washout – 2
	Центральный рубец / Макроструктура Central scar / Macrostructure	Ранговый код Ordinal code	Отсутствует – 0 Визуализируется гиподенсный рубец – 1 Зоны некроза / кальцинаты – 2 Absent – 0 Hypodense scar visualized – 1 Areas of necrosis and/or calcification – 2

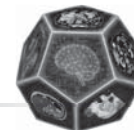


Таблица 5. (окончание)

Table 5. (end)

Лучевая модальность / Уровень Imaging modality / Level	Оцениваемый параметр Parameter assessed	Формат ввода в калькулятор Calculator input format	Описание кодированных значений (Значение-Код) Description of coded values (Value-Code)
УРОВЕНЬ II: MPT LEVEL II: MRI	Падение сигнала в противофазе (Chemical Shift) Signal drop on opposed-phase images (chemical shift)	Ранговый код Ordinal code	Сигнал стабилен (падения нет) – 0 Фиксируется падение интенсивности >20% – 1 Stable signal (no signal drop) – 0 Signal intensity drop > 20% – 1
	Тканевое свечение (Subtraction) Tissue enhancement (subtraction)	Ранговый код Ordinal code	Сигнал отсутствует (аваскулярная зона) – 0 Истинное накопление (солидный узел) – 1 No signal (avascular area) – 0 True enhancement (solid nodule) – 1
	Интенсивность T2-ВИ сигнала T2WI signal intensity	Ранговый код Ordinal code	Изо/гиперинтенсивный T2-сигнал – 0 Стойкий однородный гипоинтенсивный – 1 Iso-/hyperintense T2 signal – 0 Persistent homogeneous hypointensity – 1
	Количественный показатель ИКД Quantitative ADC	Абсолютное число Numeric value	Значение с параметрической ADC-карты в формате: X,XX • 10 ⁻³ мм ² /с Value from the parametric ADC map in the format X.XX • 10 ⁻³ mm ² /s

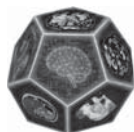


Таблица 6. Пошаговая технологическая карта дискретной работы калькулятора модели
Table 6. Stepwise workflow for the model calculator

Этап маршрута / Визит Diagnostic pathway stage / Visit	Вводимые параметры лучевых модальностей Input parameters from imaging modalities	Математический сценарий калькулятора Calculator scenario	Направляющий вектор итогового решения Direction of the final decision
ВИЗИТ 1: первичный амбулаторный прием VISIT 1: initial outpatient appointment	Данные УЗИ + ЦДК (табл. 5) Данные МСКТ (табл. 5) US + CDI data (Table 5) MDCT data (Table 5)	Сценарий 1А (диагноз ясен): параметры строго соответствуют классическим паттернам (макрожир при АМЛ или взрывной МСКТ-прирост скПКР) Сценарий 1Б (выявлена "серая зона"): пограничные значения МСКТ-перфузии, отсутствие жира в гипervasкулярных узлах, наличие центрального рубца Scenario 1A (diagnosis established): Parameters strictly match classic patterns (macroscopic fat in AML or marked arterial enhancement in ccRCC) Scenario 1B (gray zone identified): Borderline MDCT perfusion values, no fat in hypervascular nodules, or a central scar	При Сценарии 1А: калькулятор закрывает сессию. Выдается финальное заключение (>94%) вероятности гистологического типа). Направление на операцию При Сценарии 1Б: калькулятор блокирует выдачу диагноза, автоматически сохраняет профиль МСКТ/УЗИ в архив под ID пациента и выдает триггер: "Рекомендована МРТ-верификация" Scenario 1A: The calculator closes the session. A final report is issued (> 94% probability of the histological subtype), followed by referral for surgery Scenario 1B: The calculator withholds a diagnosis, automatically saves the MDCT/US profile under the patient ID, and issues the alert: "MRI verification recommended"
ПЕРИОД ОЖИДАНИЯ WAITING PERIOD	Исследование приостановлено во времени Assessment paused	Данные МСКТ/УЗИ зафиксированы в базе данных калькулятора MDCT/US data are stored in the calculator database	Пациент проходит мультипараметрическое МРТ-сканирование по специализированному протоколу The patient undergoes multiparametric MRI using the specialized protocol
ВИЗИТ 2: повторный прием по результатам дообследования VISIT 2: follow-up after additional imaging	Данные МРТ (табл. 5) MRI data (Table 5)	Сценарий 2: активация сохраненной сессии по ID пациента. Калькулятор объединяет ранее введенный МСКТ/УЗИ-профиль с новыми МР-маркерами. Выполняется финальный перерасчет весовых коэффициентов Scenario 2: The saved session is reopened using the patient ID. The calculator combines the previously entered MDCT/US profile with the new MRI markers and performs the final recalculation of weighted coefficients	Выдана окончательного дифференциального диагноза с точностью 91,3%. Определение тактики (активное наблюдение, резекция, нефрэктомия или чрескожная биопсия при пограничном ИКД) A final differential diagnosis is issued with 91.3% accuracy. Management is selected: active surveillance, resection, nephrectomy, or percutaneous biopsy for a borderline ADC value

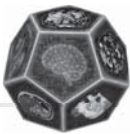
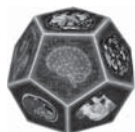


Таблица 7. Весовые коэффициенты (β) и константы прогностических модулей калькулятора
Table 7. Regression coefficients (β) and constants of the calculator prediction modules

Диагностический модуль / Целевой гистологический тип Diagnostic module / Target histotype	Параметр (Xn) Parameter (Xn)	β	SE	p	Интерпретация Interpretation
МОДУЛЬ 1 (уровень I): дифференциация скПР от других солидных опухолей MODULE 1 (Level I): Differentiation of ccRCC from other solid tumors	Константа (B_0) Артериальный прирост (Δ ед.Н) Вымывание контраста Эхогенность структуры Intercept (B_0) Arterial enhancement (Δ HU) Contrast washout Echogeticity	-4.12 +0.06 +1.85 +0.94	0.81 0.01 0.42 0.31	<0.001 <0.001 <0.001 0.002	Каждый единичный прирост плотности в ед.Н увеличивает логарифм шансов наличия скПР. Код "2" по вымыванию контраста (быстрое wash-out) является сильнейшим предиктором злокачественности на I уровне Each 1-HU increase in attenuation increases the log-odds of ccRCC. Code "2" for contrast washout (rapid washout) is the strongest predictor of malignancy at Level I.
МОДУЛЬ 2 (уровень II): дифференциация мжАМЛ* от скПР (при Δ ед. Н > 90)) MODULE 2 (Level II): Differentiation of mfAML* from ccRCC (when Δ HU > 90)	Константа (B_0) Падение сигнала (Chemical Shift) Контуры образования Intercept (B_0) Signal drop (chemical shift) Lesion margins	-2.84 +5.12 -1.24	0.65 1.04 0.45	<0.001 <0.001 0.006	Наличие кода "1" (падение сигнала на Out-of-Phase более 20%) критически смещает вероятность в пользу доброкачественной маложирной АМЛ, перекрывая влияние гиперваскулярности Code "1" (out-of-phase signal drop > 20%) markedly shifts the probability toward benign minimal-fat AML, outweighing the effect of hypervascularity
МОДУЛЬ 3 (уровень II): дифференциация пПР от плотных кист Bosniak IIF/III MODULE 3 (Level II): Differentiation of pRCC from hyperdense Bosniak IIF/III cysts	Константа (B_0) Показатель ИКД Тканевое свечение (Subtraction) Intercept (B_0) ADC Tissue enhancement (subtraction)	+6.42 -7.85 +4.15	1.21 1.48 0.92	<0.001 <0.001 <0.001	Отрицательный коэффициент ИКД означает, что чем ниже значение диффузии, тем выше риск папиллярного рака. Код "1" на субтракции подтверждает истинный солидный узел. The negative ADC coefficient indicates that lower diffusion values are associated with a higher probability of papillary renal cell carcinoma. Code "1" on subtraction images confirms a true solid nodule
МОДУЛЬ 4 (уровень II): дифференциация онкоцитомы от хромофобного РП MODULE 4 (Level II): Differentiation of oncocytoma from chRCC	Константа (B_0) Показатель ИКД Интенсивность T2-сигнала Intercept (B_0) ADC T2 signal intensity	-9.15 +8.24 -2.11	1.94 1.72 0.61	<0.001 <0.001 0.001	Положительный знак β для ИКД показывает, что свободная диффузия (высокие значения на картах) прямо указывает на онкоцитому. T2-гипоинтенсивность (код "1") смещает веса в сторону хПР The positive β for ADC indicates that relatively unrestricted diffusion (higher values on ADC maps) favors oncocytoma. T2 hypointensity (code "1") shifts the model toward chRCC

**Таблица 8.** Операционные характеристики точек отсечения ИКД для модулей калькулятора II уровня**Table 8.** Performance characteristics of ADC cutoffs for Level II calculator modules

Дилемма II уровня Level II dilemma	Порог ИКД, • 10 ⁻³ мм ² /с ADC cutoff, • 10 ⁻³ мм ² /с	AUC ± SE	95% ДИ 95% CI	Se, %	Sp, %	Решение калькулятора Calculator decision rule
Модуль А: папиллярный РП (n = 32) vs плотные кисты Bosniak IIF/III (n = 12) Module A: Papillary RCC (n = 32) vs hyperdense Bosniak IIF/III cysts (n = 12)	≤0.98	0.95 ± 0.02	0.90 ... 0.99	96.8	91.7	- ИКД ≤ 0,98 – папиллярный РП (солидный узел) - ИКД > 0,98 + отсутствие сигнала на Subtraction – Доброкачественная вязкая киста - ADC ≤ 0.98 – papillary RCC (solid nodule) - ADC > 0.98 plus no enhancement on subtraction images – benign hemorrhagic/high-protein cyst
Модуль Б: онкоцитомы (n = 30) vs хромофобный РП (n = 28) Module B: Oncocytoma (n = 30) vs chromophobe RCC (n = 28)	≤1.22	0.89 ± 0.03	0.83 ... 0.94	85.7	83.3	- ИКД > 1,22 – доброкачественная онкоцитомы - ИКД ≤ 1,15 – хромофобный РП. - Коридор 1,15 ... 1,25 – Статус: “пограничные данные. Рекомендована биопсия” - ADC > 1.22 – benign oncocytoma - ADC ≤ 1.15 – chromophobe RCC - ADC 1.15–1.25 – status: ‘Borderline findings. Biopsy recommended’

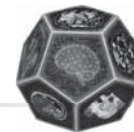
Обсуждение

Результаты применения разработанной двухуровневой диагностической модели на когорте из 395 пациентов продемонстрировали высокую общую точность (91,3%) и сбалансированность лучевых критериев. Структурированный подход позволил разделить поток пациентов на этапе стандартного обследования (УЗИ+МСКТ) и минимизировать процент диагностических ошибок за счет селективного использования экспертных протоколов МРТ.

В нашей выборке маложирные формы составили 17,1% (6 из 35 случаев) от всех ангиомиолип. На I уровне (МСКТ) данные образования симулировали скПКР, поскольку демонстрировали интенсивный прирост плотности в артериальную фазу ($\Delta > 90$ ед.Н) и отсутствие визуализируемых включений макроскопического жира (нативная плотность составляла +15 ... +28 ед.Н). Включение в алгоритм II уровня МР-последовательности “химического сдвига” (Chemical Shift Imaging) решило эту проблему: у 5 из 6 пациентов было зафиксировано падение интенсивности сигнала на фазе Out-of-Phase более чем на 22%, что позволило верифицировать мжАМЛ на дооперационном этапе. Этот результат полностью согласуется с фундаментальными работами N.

Schieda и соавт. (2018) [15] и S.G. Silverman и соавт. (2019) [5], в которых указывается, что использование индекса сигнала в противофазе позволяет дифференцировать мжАМЛ от почечно-клеточного рака со специфичностью до 95–97%. Наша модель продемонстрировала специфичность 98,2%, что обусловлено жестким требованием исключения зон некроза перед оценкой химического сдвига.

Папиллярный рак почки традиционно считается “ловушкой” для МСКТ-диагностики из-за своей гиповаскулярности. В анализируемой выборке у 9 (28,1%) из 32 пациентов с пПКР прирост плотности на МСКТ находился в пограничном диапазоне +12 ... +18 ед.Н), что, согласно классическим руководствам, не позволяет достоверно отличить солидную ткань от плотной жидкости. Перевод этих пациентов на II уровень системы с выполнением МР-субтракции (Subtraction) и расширение контрольной группы до 12 пациентов с плотными кистами позволили визуализировать истинную перфузию микрокапиллярного русла опухоли и оценить истинную подвижность воды. Наше исследование подтверждает выводы отечественных авторов (Громов А.И. и соавт. (2022) [16]), указывающих на то, что МСКТ часто недооценивает сосудистую сеть



папиллярных опухолей. МРТ с субтракцией и расчетом ИКД нивелирует артефакты жесткости излучения, обеспечивая чувствительность 96,8% в диагностике пПКР. Сходное мнение высказывают эксперты Европейского общества урогенитальной радиологии (ESUR).

Наиболее сложным аспектом дифференциальной диагностики солидных опухолей почек остается пара “онкоцитома – хПКР” вследствие их гистогенетического родства. Визуализация центрального рубца на МСК-томограмме, согласно нашим данным, произошла лишь в 36,6% случаев онкоцитом (11 из 30 пациентов), и, что более важно, аналогичная структура была зафиксирована у 3 (10,7%) пациентов с хПКР. Таким образом, морфологические критерии МСКТ и УЗИ оказались несостоятельными для надежного разделения этих опухолей. Внедрение функционального МРТ-картирования на II уровне позволило разграничить данные нозологии по клеточной плотности и структуре интерстиция. Установленный нами математический порог ИКД ($1,22 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$) показал диагностическую точность 85,7%. Полученные нами пороги близки к результатам метаанализов А.В. Rosenkrantz и соавт. (2010) [17] и данным исследовательской группы под руководством F. Cornelis и соавт. (2014) [18], определявших пограничные значения ИКД для онкоцитом в пределах $1,25\text{--}1,30 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$. Меньшее значение нашего порога ($1,22$) объясняется использованием высоких b-факторов ($b = 1000$) на современных томографах, что снижает влияние перфузионного компонента на измеряемую диффузию. Тем не менее остающийся “серый интервал ИКД” ($1,25\text{--}1,30 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$) требует обязательного выполнения чрескожной биопсии, что интегрировано в финальный шаг разработанного алгоритма.

Разработанная нами двухуровневая система концептуально созвучна с обновленными клиническими рекомендациями Европейской ассоциации урологов (EAU Guidelines 2025/2026). Эксперты EAU регламентируют обязательное подключение экспертных методов (мпМРТ или чрескожной биопсии) в случае выявления неопределенных (indeterminate) объемных образований на первичном МСКТ-этапе с целью снижения частоты неоправданных радикальных нефрэктомий доброкачественных масс.

Однако, в отличие от качественного и описательного подхода EAU, предлагающего клиницисту опираться на субъективную оценку изображений или выполнять инвазивную биопсию опухоли (RMB) [19], наша модель переводит лучевые признаки в плоскость жестких математических вычислений. Созданная матрица рангового кодирования и весовых коэффициентов регрессии позволяет калькуля-

тору выносить автоматический вердикт с точностью 91,3%. Более того, установленные нами точки отсечения ИКД ($1,22 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$ для пары “онкоцитома-хПКР” и $0,98 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$ для пары “пПКР-киста”) выступают надежным неинвазивным суррогатом морфологического исследования, сужая показания к реальной пункции почки до узкого “серого коридора значений”.

Безусловно, наше исследование уступает масштабным гайдлайнам EAU по объему выборки и репрезентативности ввиду моноцентрического характера данных и отсутствия внешней валидации на данном этапе. Тем не менее высокая доступность мпМРТ по сравнению с рекомендуемой зарубежными авторами молекулярной визуализацией (ПЭТ/КТ с ^{99m}Tc -сестамиби) делает разработанную нами дискретную двухэтапную модель более адаптированной для внедрения в реальную практику отечественного здравоохранения.

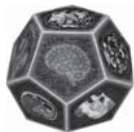
Заключение

Выполненное клиническое исследование и систематический анализ современных метаданных позволяют сформулировать следующие ключевые выводы и рекомендации для клинической практики:

- *Ограниченность стандартного лучевого поиска.* Рутинное использование мультифазной МСКТ и комплексного УЗИ с ЦДК обеспечивает надежную верификацию и определение хирургической тактики до 85% классических форм почечно-клеточного рака и типичных ангиомиолипом с наличием макроскопического жира. Однако при атипичном визуализационном профиле новообразований (отсутствие жировых включений, минимальный интратуморальный кровоток, наличие неспецифического центрального рубца) изолированное применение рентгенологических и ультразвуковых критериев приводит к формированию “серых зон” и высокому риску диагностических ошибок.

- *Дискретная архитектура и оптимизация маршрута.* Разработанная двухэтапная система и соответствующий ей прогностический калькулятор позволяют гибко разделять этапы лучевой диагностики во времени. Возможность фиксации и сохранения частичных данных УЗИ/МСКТ в рамках первичного визита пациента с последующим бесшовным добавлением экспертных МР-маркеров при повторном приеме полностью соответствует реальной логике амбулаторно-поликлинической практики, исключая дублирование процедур и оптимизируя тайм-менеджмент врача.

- *Эффективность экспертного МР-этапа.* В проведенном исследовании мы доказали, что таргетное подключение мультипараметрической магнитно-резонансной томографии (мпМРТ) на втором уровне



системы выступает в качестве высокоточного неинвазивного аналога морфологического исследования ("виртуальной биопсии"). Применение специализированных функциональных треков (Chemical Shift и Subtraction) в сочетании с количественной оценкой диффузии молекул воды обеспечивает повышение общей точности дифференциальной диагностики до 91,3% (площадь под ROC-кривой AUC = 0,92-0,95).

• **Жесткие дифференциальные критерии.** Математически доказано, что критическими точками отсечения для модулей калькулятора являются значения ИКД $0,98 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$ (дифференциация папиллярного рака и плотных геморрагических/белковых кист категории Bosniak IIF/III, Se = 96,8%, Sp = 91,7%) и $1,22 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$ (дифференциация онкоцитомы и хромофобного рака почки, Se = 85,7%, Sp = 83,3%). Выявление пограничного интервала ИКД (1,15-1,25 $\cdot 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$), "серой зоны" служит объективным и строгим показанием к проведению чрескожной пункционной биопсии с иммуногистохимической верификацией.

Участие авторов

Сажина А.А. – проведение исследования, сбор и обработка данных, обзор публикаций по теме статьи, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста, подготовка и редактирование текста.

Васильева И.В. – статистическая обработка данных.

Ратников В.А. – концепция и дизайн исследования.

Удалов Ю.Д. – концепция и дизайн исследования.

Степанова Ю.А. – участие в научном дизайне, обзор публикаций по теме статьи, утверждение окончательного варианта статьи.

Authors' participation

Sazhina A.A. – conducting research, collection and analysis of data, review of publications, analysis and interpretation of the obtained data, writing text, text preparation and editing.

Vasilyeva I.V. – statistical analysis.

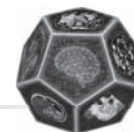
Ratnikov V.A. – concept and design of the study.

Udalov Yu.D. – concept and design of the study.

Stepanova Yu.A. – participation in scientific design, review of publications, approval of the final version of the article.

Список литературы [References]

1. Sung H., Ferlay J., Siegel R.L. et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA Cancer J. Clin.* 2021; 71 (3): 209-249. <https://doi.org/10.3322/caac.21660>
2. Ljungberg B., Albiges L., Abu-Ghanem Y. et al. European Association of Urology Guidelines on Renal Cell Carcinoma: The 2022 Update. *Eur. Urol.* 2022; 82 (4): 399-410. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2022.03.006>
3. Campbell S., Uzzo R.G., Allaf M.E. et al. Renal Mass and Localized Renal Cancer: AUA Guideline. *J. Urol.* 2017; 198 (3): 520-529. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2017.04.100>
4. Tsili A.C., Andriotis E., Gkeli M.G. et al. The Role of Imaging in the Management of Renal Masses. *Eur. J. Radiol.* 2021; 141: 109777. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2021.109777>
5. Silverman S.G., Pedrosa I., Ellis J.H. et al. Bosniak Classification of Cystic Renal Masses, Version 2019: An Update Proposal and Needs Assessment. *Radiology.* 2019; 292 (2): 475-488. <https://doi.org/10.1148/radiol.2019182646>
6. Fujita T., Iwamura M., Wakatabe Y. et al. Predictors of benign histology in clinical T1a renal cell carcinoma tumors undergoing partial nephrectomy. *Int. J. Urol.* 2014; 21 (1): 100-102. <https://doi.org/10.1111/iju.12166>
7. Shin T., Duddalwar V.A., Ukimura O. et al. Does Computed Tomography Still Have Limitations to Distinguish Benign from Malignant Renal Tumors for Radiologists? *Urol. Int.* 2017; 99 (2): 229-236. <https://doi.org/10.1159/000460303>
8. Campbell S.C., Clark P.E., Chang S.S. et al. Renal Mass and Localized Renal Cancer: Evaluation, Management, and Follow-Up: AUA Guideline: Part I. *J. Urol.* 2021; 206 (2): 199-208. <https://doi.org/10.1097/JU.0000000000001911>
9. Roussel E., Capitanio U., Kutikov A. et al. Novel Imaging Methods for Renal Mass Characterization: A Collaborative Review. *Eur. Urol.* 2022; 81 (5): 476-488. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2022.01.040>
10. Tataru O.S., Marchioni M., Crocetto F. et al. Molecular Imaging Diagnosis of Renal Cancer Using ^{99m}Tc -Sestamibi SPECT/CT and Girentuximab PET-CT-Current Evidence and Future Development of Novel Techniques. *Diagnostics (Basel).* 2023; 13 (4): 593. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13040593>
11. Baytok A., Ecer G., Balasar M., Koplay M. Computed tomography and magnetic resonance imaging characteristics of renal cell carcinoma: Differences between subtypes and clinical evaluation. *J. Clin. Imaging Sci.* 2025; 15: 10. https://doi.org/10.25259/JCIS_160_2024
12. Lee C.U., Kim J.H., Kim G. et al. Impact of tumor size and sex on diagnostic discrepancies in renal mass imaging. *Sci. Rep.* 2025; 15 (1): 19653. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-05266-9>
13. Page M.J., McKenzie J.E., Bossuyt P.M. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ.* 2021; 372: n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
14. Barentsz J.O., Richenberg J., Clements R. et al.; European Society of Urogenital Radiology. ESUR prostate MR guidelines 2012. *Eur. Radiol.* 2012; 22 (4): 746-757. <https://doi.org/10.1007/s00330-011-2377-y>
15. Schieda N., Lim R.S., McInnes M.D.F. et al. Characterization of small (<4cm) solid renal masses by computed tomography and magnetic resonance imaging: Current evidence and further development. *Diagn. Interv. Imaging.* 2018; 99 (7-8): 443-455. <https://doi.org/10.1016/j.diii.2018.03.004>



16. Громов А.И., Буйлов В.М., Капустин В.В. и др. Руководство по лучевой диагностике заболеваний почек, мочеточников и мочевого пузыря. М.: Триада-Х, 2022. 344 с.
Gromov A.I., Builov V.M., Kapustin V.V. with comparison. Guide to radiation diagnostics of diseases of the kidneys, ureters and bladder. M.: Triada-X, 2022. 344 p. (In Russian)
17. Rosenkrantz A.B., Hindman N., Fitzgerald E.F. et al. MRI features of renal oncocytoma and chromophobe renal cell carcinoma. *Am. J. Roentgenol.* 2010; 195 (6): W421-427. <https://doi.org/10.2214/AJR.10.4718>
18. Cornelis F., Tricaud E., Lasserre A.S. et al. Routinely performed multiparametric magnetic resonance imaging helps to differentiate common subtypes of renal tumours. *Eur. Radiol.* 2014; 24 (5): 1068-1080. <https://doi.org/10.1007/s00330-014-3107-z>
19. EAU Guidelines. Edn. presented at the EAU Annual Congress London, United Kingdom 2026. ISBN 978-94-92671-19-6. EAU Guidelines Office, Arnhem, the Netherlands.

Для корреспонденции*: Сажина Анна Андреевна – e-mail: anna_sazhina2000@mail.ru

Сажина Анна Андреевна – врач-стажер отделения лучевой и радиоизотопной диагностики ФГБУ “Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна” ФМБА России, Москва. <https://orcid.org/0009-0008-2843-6697>

Васильева Ирина Витальевна – канд. мед. наук, заместитель заведующего центральным организационно-методическим отделом, врач-статистик ФГБУ “Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна” ФМБА России; доцент кафедры медицинской кибернетики и информатики МБФ им. С.А. Гапаряна ФГАОУ ВО “Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-6986-901X>

Ратников Вячеслав Альбертович – доктор мед. наук, профессор, генеральный директор ФГБУ “Федеральный научно-клинический центр инфекционных болезней Федерального медико-биологического агентства”; профессор кафедры лучевой диагностики ФГБОУ ВО “Санкт-Петербургский государственный университет”, Санкт-Петербург. <https://orcid.org/0000-0002-9645-8408>

Удалов Юрий Дмитриевич – доктор мед. наук, доцент, генеральный директор ФГБУ “Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна” ФМБА России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-9739-8478>

Степанова Юлия Александровна – доктор мед. наук, профессор, старший научный сотрудник отделения ультразвуковой диагностики ФГБУ “НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-5793-5160>

Contact*: Anna A. Sazhina – e-mail: anna_sazhina2000@mail.ru

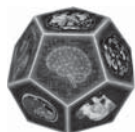
Anna A. Sazhina – Intern, Radiology and Radioisotope Diagnostics Department, A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Moscow. <https://orcid.org/0009-0008-2843-6697>

Irina V. Vasilieva – Cand. of Sci. (Med.), Deputy Head of the Department – Physician-Statistician, A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of the Federal Medical and Biological Agency of Russia; associate professor of S.A. Gaparyan Medical Cybernetics and Informatics Department of Medical and Biological Sciences Faculty, Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-6986-901X>

Vyacheslav A. Ratnikov – Doct. of Sci. (Med.), Professor, General Director, Federal Scientific and Clinical Center for Infectious Diseases of the Federal Medical and Biological Agency; Professor of Radiology Diagnostics Department, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg. <https://orcid.org/0000-0002-9645-8408>

Yuri D. Udalov – Doct. of Sci. (Med.), Associate Professor, General Director, A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-9739-8478>

Yulia A. Stepanova – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Senior Researcher, Ultrasound Diagnostics Department, A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-5793-5160>



Роль ПЭТ/КТ мочевого пузыря с ^{11}C -холином в диагностике позднего лучевого цистита (пилотное исследование)

© Бердичевский Б.А.^{1*}, Зубик Г.В.¹, Павлова И.В.¹, Гоняев А.Р.², Учаев Д.А.³, Корабельников М.А.⁴

¹ Клиника урологии ФГБОУ ВО «Тюменский государственный медицинский университет» Минздрава России; 625023 Тюмень, ул. Одесская, д. 54, Российская Федерация

² Клинический госпиталь «Мать и дитя»; 625062 Тюмень, ул. Юрия Семовских, д. 20, Российская Федерация

³ Научно-образовательный центр «Нанотехнологии» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» Минздрава России; 454080 Челябинск, просп. Ленина, д. 76, Российская Федерация

⁴ Радиологический центр ГАУЗ Тюменской области МКМЦ «Медицинский город»; 625041 Тюмень, ул. Барнаульская, д. 32, Российская Федерация

Цель исследования: рассмотреть возможности применения ПЭТ/КТ с ^{11}C -холином для визуальной и ультраструктурной оценки барьерных функций стенки мочевого пузыря у женщин с поздним лучевым циститом. Исследование носит пилотный характер и ранее аналогичных ему не проводилось.

Материал и методы. Проведено комплексное обследование четырех женщин с различной степенью выраженности визуальных проявлений позднего лучевого цистита. Изучалась тропность ^{11}C -холина к стенке мочевого пузыря у этих пациенток (характеризуя ее по величине используемого стандартно при ПЭТ/КТ показателя стандартизированной величины поглощения радиофармпрепарата (в мировой практике – standardized uptake value – SUV), в частности, SUV_{max} в комплексе с результатами сканирующей электронной микроскопии всех элементов стенки мочевого пузыря в едином блоке.

Результаты. Установлено, что тропность ^{11}C -холина к стенке мочевого пузыря при позднем лучевом цистите коррелирует с выраженностью ультраструктурных изменений в его стенке, что может быть использовано в качестве дополнительного маркера состоятельности барьерных функций мочевого пузыря.

Заключение. Клиническое применение разработанной нами программы для ЭВМ позволяет врачу-урологу по цифровому показателю (SUV_{max}) по данным ПЭТ/КТ с ^{11}C -холином получать вероятную визуальную и ультраструктурную 3D-характеристику всех элементов его стенки.

Ключевые слова: ПЭТ/КТ; ^{11}C -холин; сканирующая электронная микроскопия; поздний лучевой цистит

Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Бердичевский Б.А., Зубик Г.В., Павлова И.В., Гоняев А.Р., Учаев Д.А., Корабельников М.А. Роль ПЭТ/КТ мочевого пузыря с ^{11}C -холином в диагностике позднего лучевого цистита (пилотное исследование). *Медицинская визуализация*. 2026; 30 (3): 90–96. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1606>

Поступила в редакцию: 10.10.2025.

Принята к печати: 23.05.2026.

Опубликована online: 30.09.2026.

The role of ^{11}C -Choline PET/CT scanning of the bladder in the diagnosis of late radiation cystitis (pilot study)

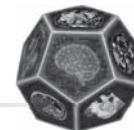
© Boris A. Berdichevsky^{1*}, Grigory V. Zubik¹, Irina V. Pavlova¹, Artem R. Gonyaev², Daniil A. Uchaev³, Mikhail A. Korabelnikov⁴

¹ Urology Clinic, Tyumen State Medical University; 54, Odesskaya str., Tyumen 625023, Russian Federation

² “Mother and Child” Clinical Hospital; 20, Yuri Semovskikh str., Tyumen 625062, Russian Federation

³ Nanotechnology Research and Educational Center, South Ural State University of the Ministry of Health of the Russian Federation; 76, Lenin prosp., Chelyabinsk 454080, Russian Federation

⁴ Radiology Center of the State Healthcare Institution of the Tyumen Region, the Medical City Clinical Medical Center; 32, Barnaul'skaya str., Tyumen 625041, Russian Federation



The aim of the study was to consider the possibilities of using ^{11}C -choline PET/CT for visual and ultrastructural assessment of bladder wall barrier functions in women with late radiation cystitis.

Materials and methods. A comprehensive examination of four women with varying visual manifestations of late radiation cystitis was conducted. The affinity of the bladder wall for ^{11}C -choline was studied using PET/CT as the standardized uptake level of labeled molecules (SUV_{max}) coming from urine in combination with the results of scanning electron microscopy of all bladder wall elements in a single block.

Results. It was found that the affinity of the bladder wall for labeled ^{11}C -choline molecules in late radiation cystitis correlates with the severity of ultrastructural changes in its wall, which can be used as an additional marker of bladder barrier function integrity.

Conclusion. The clinical application of our developed computer program allows urologists to obtain a probable visual and ultrastructural 3D reconstruction of all elements of the bladder wall using the digital value (SUV_{max}) of ^{11}C choline PET/CT.

Keywords: PET/CT; ^{11}C choline; scanning electron microscopy; late radiation cystitis

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Berdichevsky B.A., Zubik G.V., Pavlova I.V., Gonyaev A.R., Uchaev D.A., Korabelnikov M.A. The role of ^{11}C -Choline PET/CT scanning of the bladder in the diagnosis of late radiation cystitis (pilot study). *Medical Visualization*. 2026; 30 (3): 90-96. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1606>

Received: 10.10.2025.

Accepted for publication: 23.05.2026.

Published online: 30.09.2026.

Введение

В обзорной статье Е.А. Николаевой и соавт. [1], опубликованной в 2022 г. и посвященной часто встречающимся не только злокачественным, но и доброкачественным вариантам накопления фтордезоксиглюкозы (ФДГ) при заболеваниях органов малого таза у женщин, авторы обратили наше внимание на то, что этот радиофармпрепарат (РФП), обладая высокой чувствительностью в отношении злокачественных образований, также может быть специфичен и для доброкачественных воспалительных процессов за счет их способности гипераккумулировать ФДГ. Авторы статьи поднимают проблему стандартизации метаболических показателей уровня захвата РФП (SUV_{max}) здоровыми и воспаленными тканями [1]. На примере эндометрия здоровых женщин ранее было показано, что интенсивность поглощения РФП (SUV_{max}) в пременопаузе здоровых женщин составляет $2,6 \pm 1,1$. Он снижается в постменопаузе до значений $1,7 \pm 0,7$ [2]. При онкологических заболеваниях может возрастать до $11,4 \pm 0,5$ и не зависеть от стадии и размера опухоли [3, 4]. Воспаленные ткани также обладают тропностью к РФП, но с меньшей интенсивностью его поглощения и длительностью удержания [5]. Таким образом, ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ обладает высокой диагностической ценностью в дифференциальной диагностике рецидивов и постлучевых изменений в ранее облученных зонах, что требует проведения специального изучения и уточнения.

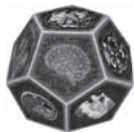
В 2011 г. на международной конференции Общества инженеров IEEE в области медицины и биологии в докладе на тему: "Интегративная навигация мочевого пузыря при эндоскопии" обсуждалась важность создания интуитивных навигационных систем 3D-панорамного изображения слизи-

стой оболочки мочевого пузыря, основанных на интеграции результатов сложных высоких технологич верификации диагноза путем разработки и внедрения недорогих и доступных навигационных аналогов [6-8]. При этом изучение физиологических и неонкологических причин поглощения меченых молекул рекомендовалось анализировать для формирования точной и исчерпывающей интерпретации неожиданно полученных результатов ПЭТ/КТ [9]. При этом при использовании вместо ФДГ ^{11}C -холина удавалось более точно дифференцировать воспаление от онкологии, а также оценивать характер и глубину поражения стенки мочевого пузыря [10-12].

Цель исследования: оценка информативности ПЭТ/КТ-сканирования всего тела человека с ^{11}C -холином для ультраструктурного анализа барьерных функций стенки мочевого пузыря у женщин с поздним лучевым циститом.

Материал и методы

В анализируемую группу было включено 4 женщины с медианой возраста 39,5 (37;42) года, находившихся под наблюдением в урологической клинике Тюменского медицинского университета с различно выраженными визуальными проявлениями позднего лучевого цистита. Клинические проявления болезни возникали в период от 12 до 24 мес после дистанционной лучевой терапии рака шейки матки II стадии. В стационарных условиях под общим обезболиванием женщинам проводилась смотровая цистоскопия с забором материала для проведения сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). ПЭТ/КТ-сканирование всего тела с ^{11}C -холином выполнялось по направлению онколога с целью исключения прогрессирования основ-



ного заболевания и вовлеченности в него мочевого пузыря. Изучалась тропность данного РФП к стенке мочевого пузыря по расчетному показателю SUV_{max} , который рассчитывался стандартным образом средствами программного обеспечения ПЭТ/КТ-томографа Biograph производства фирмы Siemens. ПЭТ/КТ-сканирование с внутривенным контрастированием при выполнении КТ-этапа исследования имело параметры: напряжение на трубке 120 кВ, тока >150 мАс, с оптимальной толщиной срезов, позволяющих сделать реконструкции с толщиной получаемых производных срезов не более 2 мм. При этом скорость введения контраста составляла 3 мл/с с индивидуальным расчетом объема из расчета 1,5 мл контрастного препарата на 1 кг массы тела. Сканирование всего тела пациента проводили по стандартной методике сразу после введения контрастного препарата, общее время процедуры составляло 30 мин.

СЭМ выполнялась по стандартной методике в Тюменском научном центре Сибирского отделения РАН на аппарате сканирующей электронной микроскопии Hitachi High-Tech's SU3800/SU3900. Клиническая навигация ультраструктурной состоятельности барьерных функций стенки мочевого пузыря путем 3D-реконструкции цистоскопической картины и ультраструктурного состояния всех элементов его стенки в едином блоке по показателю стандартизированного уровня захвата РФП SUV_{max} выполнялась с использованием разработанной и внедренной нами оригинальной программы для ЭВМ.

Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом (Комитет по этике ФГБОУ ВО «Тюменский ГМУ Минздрава России») (протокол № 124 от 23.10.2024). Все пациенты, данные которых включены в исследование, при поступлении в стационар подписывали информированное добровольное согласие на использование результатов обследования и лечения в научных целях.

Результаты исследования

В проведенном исследовании получены данные, указывающие на то, что тропность ^{11}C -холина к стенке мочевого пузыря при различных визуальных проявлениях позднего лучевого воспаления коррелирует с выраженностью ультраструктурных изменений его стенки. Так, при легкой гиперемии сосудов слизистой оболочки уретерий представлен полигональными клетками сравнительно одинакового размера с плотно сомкнутыми межклеточными

пространствами. Поверхность фасеточных клеток покрыта короткими микроворсинками за счет складчатости поверхностных мембран. Элементы собственной пластинки, включающие эпителиоциты, стромальные клетки и базальные мембраны, интактны, а структурированные мышечные волокна детрузора имеют узкие межклеточные промежутки. При этом показатель стандартизированного уровня захвата молекул ^{11}C -холина стенкой мочевого пузыря был минимальным: $SUV_{max} < 5$. Для более выраженных визуальных изменений слизистой оболочки в виде ее помутнения, появления телеангиоэктазий, локальных эрозий или тотальной гиперемии с отеком слизистой оказалось характерным нарастающая деформация уротелиальных клеток с появлением шероховатости, расширяющей межклеточные пространства. Это сопровождалось нарушением целостности сплошного уротелиального покрова с частичным обнажением собственной пластинки слизистой, появлением рыхлой внеклеточной соединительной ткани, окружающей фрагменты разрушенных эпителиоцитов, стромальных клеток, базальных мембран, покрытых сетью из фибрина. Все это сопровождалось изменением размеров и формы миоцитов детрузора, расширением межклеточных пространств между ними и дополнительным насыщением стенки мочевого пузыря молекулами ^{11}C -холина (SUV_{max} от 6 до 100) (рис. 1).

В процессе создания удобной для восприятия практикующим урологом инструмента по клинической навигации ультраструктурной и молекулярно-клеточной состоятельности барьерных функций стенки мочевого пузыря нами использована оригинальная ЭВМ-программа, позволяющая по цифровому повоксельному пространственному распределению значений SUV_{max} создавать реконструкцию вероятной 3D-цистоскопической картины слизистой оболочки и всех элементов стенки мочевого пузыря (слизистая, собственная пластинка, миоциты детрузора) в едином блоке, увеличенном в более 6000 раз, с количественной оценкой степени ее насыщения ^{11}C -холином (рис. 2).

Так, на представленной 3D-виртуальной модели вариантов визуальных проявлений позднего лучевого цистита показана ультраструктурная 3D-реконструкция всех элементов стенки мочевого пузыря (1), где цифровой показатель (2) насыщения стенки мочевого пузыря ^{11}C -холина (SUV_{max}) является индикатором снижения барьерной функции стенки мочевого пузыря.

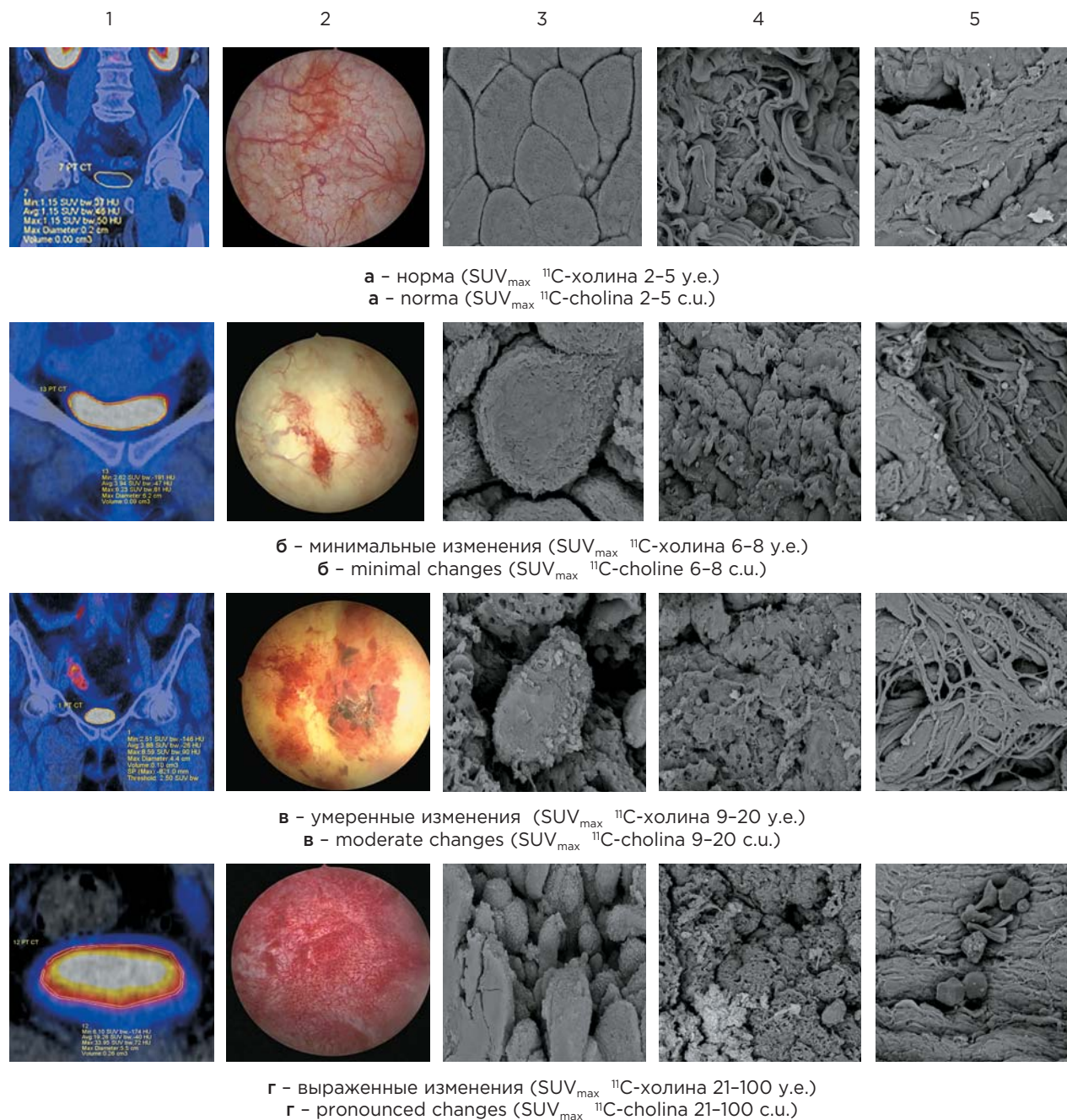
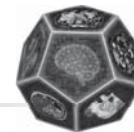


Рис. 1. Многофакторная визуальная оценка структурно-функционального состояния стенки мочевого пузыря по результатам ПЭТ/КТ с ^{11}C -холином (1), смотровой цистоскопии (2), электронной микроскопии слизистого слоя (3), подслизистого слоя (4), мышечного слоя (5) мочевого пузыря. а - норма; б - минимальные изменения; в - умеренные изменения; г - выраженные изменения.

Fig. 1. Multifactorial visual assessment of the structural and functional state of the bladder wall based on the results of PET/CT with ^{11}C -choline (1), viewing cystoscopy (2), electron microscopy of the mucous layer (3), submucous layer (4), and muscular layer (5) of the bladder. а - normal; б - minimal changes; в - moderate changes; г - severe changes.

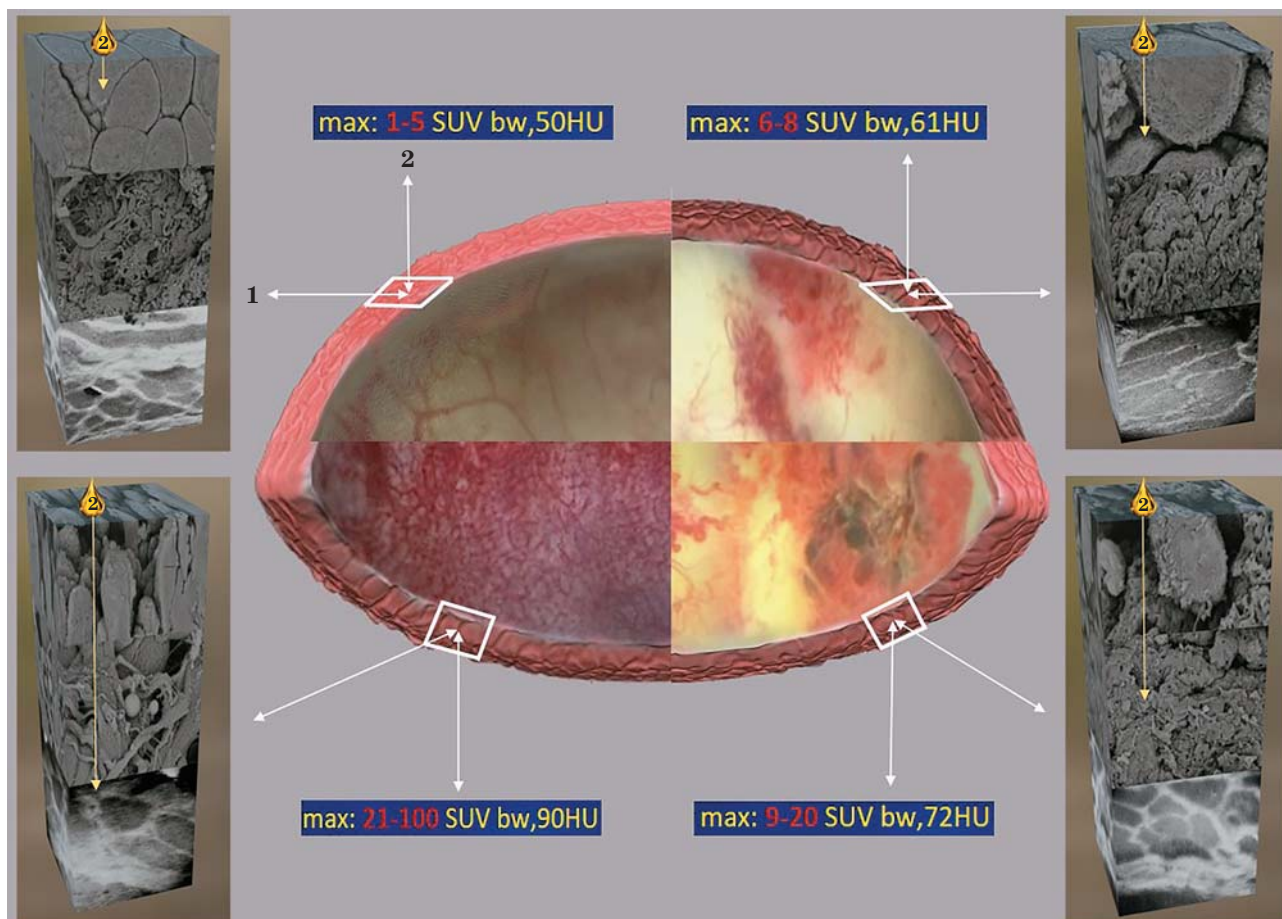
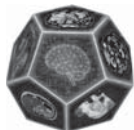


Рис. 2. Схема клинической навигации ультраструктурной и молекулярно-клеточной состоятельности барьерных функций стенки мочевого пузыря (1 – все элементы стенки мочевого пузыря в едином блоке с увеличением $\times 6000$, 2 – цифровой показатель насыщения стенки мочевого пузыря ^{11}C холина $\text{SUV}_{\max}$).

Fig. 2. Scheme of clinical navigation of ultrastructural and molecular-cellular competence of the barrier functions of the bladder wall (1 – all elements of the bladder wall in a single block with a magnification $\times 6000$, 2 – digital indicator $\text{SUV}_{\max}$ of saturation of the bladder wall ^{11}C choline molecules).

Обсуждение

В настоящем исследовании был использован метод ПЭТ/КТ-сканирования с ^{11}C -холином для оценки ультраструктурного состояния стенки мочевого пузыря у женщин с поздним лучевым циститом. Особое значение при этом уделялось максимальному насыщению цифрового значения $\text{SUV}_{\max}$ информацией в удобной для восприятия практическим врачом форме макроскопического и ультраструктурного поражения мочевого пузыря [13–19].

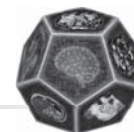
Разработанная нами оригинальная ЭВМ-программа позволит урологу в условиях поликлинического приема по цифровым данным электронного носителя, содержащего результаты ПЭТ/КТ-сканирования всего тела с ^{11}C -холином, независимо от показаний для его проведения смоделировать высоковероятную виртуальную 3D-картину результатов цистоскопии и ультраструктурного состояния

всех элементов стенки мочевого пузыря в едином блоке и использовать эти данные в качестве дополнительного инструмента по оценке состоятельности барьерных функций мочевого пузыря.

Заключение

Клиническое применение навигации с помощью разработанной нами оригинальной программы для ЭВМ позволит врачу-урологу по цифровому показателю стандартизированной величины поглощения $\text{SUV}_{\max}$ ^{11}C -холина стенкой мочевого пузыря получать вероятную визуальную и ультраструктурную 3D-реконструкцию всех элементов его стенки с количественной оценкой степени поглощения РФП.

Недостатком выполненной работы является ограниченное количество наблюдений, применение в качестве условной нормы показателя собственных наблюдений, полученных на региональном



уровне с применением программного обеспечения ПЭТ/КТ-томографа (Biograph) компании Siemens. Необходима верификация предложенного нами подхода на статистически существенно более мощных группах пациенток. Также в данном исследовании не проводился анализ особенностей клинических проявлений воспаления мочевого пузыря. Наша программа может быть получена по электронной почте по запросу у автора для переписки данной статьи.

Участие авторов

Бердичевский Б.А. – концепция и дизайн исследования, обзор публикаций по теме статьи, утверждение окончательного варианта статьи, анализ и интерпретация полученных данных, ответственность за целостность всех частей статьи.

Зубик Г.В. – написание текста, подготовка и редактирование текста, обзор публикаций по теме, анализ и интерпретация полученных данных, ответственность за целостность всех частей статьи.

Павлова И.В. – сбор и обработка данных, участие в научном дизайне, проведение исследования.

Гоняев А.Р. – сбор и обработка данных, участие в научном дизайне, проведение исследования.

Учаев Д.А. – сбор и обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, проведение исследования.

Корабельников М.А. – сбор и обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, проведение исследования.

Authors' participation

Berdichevsky B.A. – concept and design of the study, review of publications, approval of the final version of the article, analysis and interpretation of the obtained data, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Zubik G.V. – writing text, text preparation and editing, review of publications, analysis and interpretation of the obtained data, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Pavlova I.V. – collection and analysis of data, participation in scientific design, conducting research.

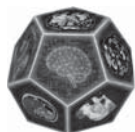
Gonyaev A.R. – collection and analysis of data, participation in scientific design, conducting research.

Uchaev D.A. – collection and analysis of data, analysis and interpretation of the obtained data, conducting research.

Korabelnikov M.A. – collection and analysis of data, analysis and interpretation of the obtained data, conducting research.

Список литературы [References]

1. Николаева Е.А., Тарачкова Е.В., Шейх Ж.В., Тюрин И.Е. Роль ПЭТ/КТ в онкогинекологии (обзор литературы). *Медицинская визуализация*. 2023; 27 (1): 145–157. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1198> Nikolaeva E.A., Tarachkova E.V., Sheikh Zh.V., Tyurin I.E. The role of PET/CT in gynecological oncology (literature review). *Medical Visualization*. 2023; 27 (1): 145–157. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1198> (In Russian)
2. Lerman H., Metser U., Grisaru D. et al. Normal and abnormal 18F-FDG endometrial and ovarian uptake in pre- and postmenopausal patients: assessment by PET/CT. *J. Nucl. Med.* 2004; 45 (2): 266–271. PMID: 14960646
3. Kidd E.A., Spencer C.R., Huettner P.C. et al. Cervical cancer histology and tumor differentiation affect ¹⁸F-fluorodeoxyglucose uptake. *Cancer*. 2009; 115 (15): 3548–3554. <https://doi.org/10.1002/cncr.24400>
4. Drayer S.M., Shank J.J. Infectious diseases mimicking ovarian carcinomatosis. *Gynecol. Oncol. Rep.* 2018; 26: 29–31. <https://doi.org/10.1016/j.gore.2018.08.008>
5. Солодкий В.А., Нуднов Н.В., Крейнина Ю.М., Шевченко Л.Н., Каскулова М.Х., Титова В.А., Пронькина Е.В., Воробьева В.О. Роль ¹⁸F-ФДГ ПЭТ-КТ в посттерапевтическом мониторинге у больных раком шейки и тела матки с подозрением на прогрессирование в ранее облученных зонах. *Медицинская визуализация*. 2023; 27 (2): 99–109. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1177> Solodkiy V.A., Nudnov N.V., Kreynina Yu.M. et al. The role of ¹⁸F-FDG PET-CT in post-therapy monitoring in patients with cervical and uterine cancer with suspected progression in previously irradiated areas. *Medical Visualization*. 2023; 27 (2): 99–109. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1177> (In Russian)
6. Behrens A., Grimm J., Gross S., Aach T. Inertial navigation system for bladder endoscopy. In: 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society; 2011; Boston, MA, USA. IEEE, 2011: 5376–5379. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6091330>
7. Luo X., Mori K., Peters T.M. Advanced Endoscopic Navigation: Surgical Big Data, Methodology, and Applications. *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 2018; 20: 221–251. <https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-062117-120917>
8. Lee Y.K., Jiang Y.H., Jhang J.F. et al. Changes in the Ultrastructure of the Bladder Urothelium in Patients with Interstitial Cystitis after Intravesical Injections of Platelet-Rich Plasma. *Biomedicines*. 2022; 10 (5): 1182. <https://doi.org/10.3390/biomedicines10051182>
9. Hotta M., Rieger A.C., Jafarvand M.G. et al. Non-oncologic incidental uptake on FAPI PET/CT imaging. *Br. J. Radiol.* 2023; 96 (1142): 20220463. <https://doi.org/10.1259/bjr.20220463>
10. Коротков О.В., Короткова Л.И., Станжевский А.А. Диагностика лучевых повреждений мочевого пузыря с помощью ПЭТ-КТ в эксперименте. *Вопросы онкологии*. 2024; 70 (3): 493–498. <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2024-70-3-493-498> Korytov O.V., Korytova L.I., Stanzhevsky A.A. Experimental Diagnosis of Radiation-Induced Bladder Damage with PET-CT. *Issues in Oncology*. 2024; 70 (3): 493–498. <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2024-70-3-493-498> (In Russian)
11. Бердичевский Б.А., Бердичевский В.Б., Гоняев А.Р., Зубик Г.В. Компьютерная программа визуальной и блочной 3D-ультраструктурной визуализации вероятности нарушения мочеточникового барьера мочевого пузыря по результатам ПЭТ/КТ всего тела ¹¹C-холином. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025610931. 2025. Berdichevsky B.A., Berdichevsky V.B., Gonyaev A.R., Zubik G.V. Computer Program for Visual and Block 3D Ultrastructural Visualization of the Probability of Bladder Ureteral Barrier Disruption Based on Whole-Body ¹¹C-Choline PET/CT Results. Certificate of State Registration of Computer Program No. 2025610931. 2025. (In Russian)



12. Смолярчук М.Я., Киреева Е.Д., Рыжов С.А. и др. Рекомендации по проведению и описанию исследований методом позитронно-эмиссионной томографии, совмещенной с компьютерной томографией. Издание второе, дополненное: методические рекомендации. Серия "Лучшие практики лучевой и инструментальной диагностики". Вып. 87. 2-е изд., доп. М.: ГБУЗ "НПКЦ ДиТ ДЗМ", 2021. 80 с. Smolyarchuk M.Ya., Kireeva E.D., Ryzhov S.A. et al., compilers. Recommendations for conducting and describing studies using the positron emission tomography method combined with computed tomography. Second edition, supplemented: methodological recommendations. Series "Best Practices in Radiation and Instrumental Diagnostics". Issue 87. 2nd ed., suppl. Moscow: State Budgetary Healthcare Institution "Research and Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine, Department of Health of the City of Moscow", 2021. 80 p. (In Russian)
13. Tizro P., Choi C., Khanlou N. Sample Preparation for Transmission Electron Microscopy. *Methods Mol. Biol.* 2019; 1897: 417-424. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8935-5_33
14. Хаджибаев М.А., Махкамов К.Э., Азизов М.М. Интеграция компьютерного инжиниринга и аддитивных технологий в медицинскую сферу. *Вестник экстренной медицины.* 2019; 12 (2): 5-11. <https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-kompyuternogo-inzhiniringa-i-additivnyh-tehnologiy-v-meditsinskuyu-sferu?ysclid=mqe4eju2y6309678140> Khadzhibaev M.A., Makhkamov K.E., Azizov M.M. Integration of computer engineering and additive technologies in the medical field. *Bulletin of Emergency Medicine.* 2019; 12 (2). <https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-kompyuternogo-inzhiniringa-i-additivnyh-tehnologiy-v-meditsinskuyu-sferu?ysclid=mqe4eju2y6309678140> (In Russian)
15. Гранов А.М., Тютин Л.А., Рыжкова Д.В. и др. Способность вызывать злокачественные новообразования органов малого таза. Патент РФ № RU2246259C1. 2005. Granov A.M., Tyutin L.A., Ryzhkova D.V. et al. Ability to cause malignant neoplasms of the pelvic organs. Russian Federation Patent RU2246259C1. 2005. (In Russian)
16. Pinto J.T.R. A CAD system for 3D reconstruction of the urinary bladder from computed tomography data. 2016. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:195736100>
17. Ибишев Х.С., Крахоткин Д.В., Коган М.И. и др. Способ дифференциальной диагностики хронического рецидивирующего цистита. Патент РФ № 2 723 024. 2020. Ibishev Kh.S., Krakhotkin D.V., Kogan M.I., et al. A method for differential diagnosis of chronic recurrent cystitis. Russian Federation Patent RU 2 723 024. 2020. (In Russian)
18. Andrikos I., Stefanou K., Bellos C. et al. EDIT Software: A tool for the semi-automatic 3D reconstruction of bladder cancer and urinary bladder of animal models. *Comput. Methods Programs Biomed.* 2023; 232: 107448. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2023.107448>
19. Ichimura K., Kakuta S., Kawasaki Y. Morphological process of podocyte development revealed by block scanning electron microscopy. *J. Cell. Sci.* 2017; 130 (1): 132-142. <https://doi.org/10.1242/jcs.18781>

Для корреспонденции: Бердичевский Борис Аркадьевич – e-mail: doktor_bba@mail.ru

Бердичевский Борис Аркадьевич – доктор мед. наук, профессор, профессор кафедры детской хирургии с курсом урологии и андрологии ФГБОУ ВО "Тюменский государственный медицинский университет" Минздрава России, Тюмень. <https://orcid.org/0000-0002-9414-8510>

Зубик Григорий Васильевич – стажер-исследователь Института клинической медицины ФГБОУ ВО "Тюменский государственный медицинский университет" Минздрава России, Тюмень. <https://orcid.org/0009-0005-1333-2922>

Павлова Ирина Валерьевна – канд. мед. наук, врач-уролог высшей квалификационной категории, докторант кафедры детской хирургии с курсом урологии и андрологии ФГБОУ ВО "Тюменский государственный медицинский университет" Минздрава России, Тюмень. <https://orcid.org/0000-0002-5079-430X>

Гоняев Артем Романович – канд. мед. наук, заведующий отделением оперативной урологии Клинического госпиталя "Мать и дитя", Тюмень. <https://orcid.org/0000-0002-1619-4714>

Учаев Даниил Анатольевич – научный сотрудник отдела электронной микроскопии Научно-образовательного центра "Нанотехнологии" ФГАОУ ВО "Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)" Минздрава России, Челябинск. <https://orcid.org/0000-0002-8623-4769>

Корабельников Михаил Алексеевич – врач-радиолог Радиологического центра ГАУЗ Тюменской области МКМЦ "Медицинский город", Тюмень. <https://orcid.org/0009-0001-2226-765X>

Contact*: Boris A. Berdichevsky – e-mail: doktor_bba@mail.ru

Boris A. Berdichevsky – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Professor of the Department of Pediatric Surgery with a Course in Urology and Andrology, Tyumen State Medical University, Tyumen. <https://orcid.org/0000-0002-9414-8510>

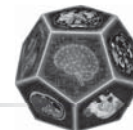
Grigory V. Zubik – Research Intern, Institute of Clinical Medicine, Tyumen State Medical University, Tyumen. <https://orcid.org/0009-0005-1333-2922>

Irina V. Pavlova – Cand. of Sci. (Med.), Urologist of the highest qualification category, Doctoral Candidate of the Department of Pediatric Surgery with a Course in Urology and Andrology, Tyumen State Medical University, Tyumen. <https://orcid.org/0000-0002-5079-430X>

Artem R. Gonyayev – Cand. of Sci. (Med.), Head of the Department of Operative Urology, "Mother and Child" Clinical Hospital, Tyumen. <https://orcid.org/0000-0002-1619-4714>

Daniil A. Uchaev – Researcher, Electron Microscopy Department, Nanotechnology Research and Education Center, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk. <https://orcid.org/0000-0002-8623-4769>

Mikhail A. Korabelnikov – Radiologist, Radiology Center, Medical City Clinical Medical Center, Tyumen. <https://orcid.org/0009-0001-2226-765X>



Прогностические параметры гемодинамики матки у беременных I триместра после лечения хронического эндометрита

© Озерская И.А.^{1*}, Порховатый С.Я.², Казарян Г.Г.³, Ожогина Е.В.⁴

¹ ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)» Минобрнауки России; 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Российская Федерация

² ООО «Асклепион»; 125222 Москва, ул. Дубравная, д. 41, корп. 2, Российская Федерация

³ ООО «Медскан»; 119421 Москва, ул. Обручева, д. 21А, Российская Федерация

⁴ Центр репродукции и генетики «Нова Клиник»; 119415 Москва, ул. Лобачевского, д. 20, Российская Федерация

Цель исследования: оценить возможности использования индекса артериальной перфузии (ИАП, API) матки и параметров доплерометрии маточных артерий для характеристики маточного кровоснабжения в I триместре беременности у пациенток с перенесенным хроническим эндометритом и определения их прогностической значимости в отношении неблагоприятных исходов первой половины беременности.

Материал и методы. В исследование включена 401 беременная женщина I триместра. Пациентки были разделены на основную группу (с перенесенным хроническим эндометритом в анамнезе) и группу сравнения (без указаний на хронический эндометрит). Оценивали показатели доплерометрии маточных артерий, рассчитывали ИАП матки как интегральный показатель артериального кровоснабжения. Анализ проводили отдельно для гестационных сроков 5–7⁺⁶, 8–10⁺⁶ и 11–13⁺⁶ нед беременности. Для межгрупповых сравнений использовали непараметрические методы с расчетом разности медиан и 95% доверительных интервалов. Прогностическую значимость показателей оценивали методом ROC-анализа.

Результаты. Во всех гестационных сроках I триместра у пациенток основной группы выявлено снижение ИАП по сравнению с группой сравнения. Наиболее выраженные различия зарегистрированы в сроке 11–13⁺⁶ нед беременности, где ИАП демонстрировал наибольшую величину эффекта (AUC 0,92), превосходя таковую для скоростных показателей и индексов сосудистого сопротивления, и высокую прогностическую значимость в отношении неблагоприятных исходов первой половины беременности. Индексы сосудистого сопротивления (PI, RI) характеризовались меньшей устойчивостью различий и большей операторозависимостью по сравнению с ИАП.

Заключение. ИАП матки является информативным интегральным показателем маточного кровоснабжения в I триместре беременности. Перенесенный хронический эндометрит ассоциирован со снижением ИАП и неблагоприятным профилем маточной гемодинамики. Полученные данные свидетельствуют о перспективности использования ИАП для оценки условий ранней плацентации и стратификации риска неблагоприятных исходов беременности.

Ключевые слова: ультразвуковая диагностика; I триместр беременности; хронический эндометрит; маточные артерии; доплерометрия; индекс артериальной перфузии

Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Озерская И.А., Порховатый С.Я., Казарян Г.Г., Ожогина Е.В. Прогностические параметры гемодинамики матки у беременных I триместра после лечения хронического эндометрита. *Медицинская визуализация*. 2026; 30 (3): 97–108. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1631>

Поступила в редакцию: 18.01.2026.

Принята к печати: 02.04.2026.

Опубликована online: 30.09.2026.

Predictive uterine hemodynamic parameters in the first trimester of pregnancy following treatment for chronic endometritis

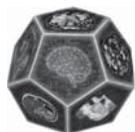
© Irina A. Ozerskaya^{1*}, Sergey Ya. Porkhovaty², Gayane G. Kazaryan³, Ekaterina V. Ozhogina⁴

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

² LLC "Asklepion"; 41, bldg. 2, Dubravnyaya str., Moscow 125222, Russian Federation

³ LLC "Medscan"; 21A, Obruchev str., Moscow 119421, Russian Federation

⁴ Nova Clinic Center for Reproduction and Genetics; 20, Lobachevsky str., Moscow 119415, Russian Federation



Objective: To evaluate the usefulness of the uterine arterial perfusion index (API) and uterine artery Doppler parameters for assessing uterine blood supply in the first trimester of pregnancy in women with a history of chronic endometritis and to determine their prognostic value for adverse outcomes in the first half of pregnancy.

Material and methods. Pregnant women (401) in the first trimester were enrolled and divided into a main group (with a history of chronic endometritis) and a comparison group (without evidence of chronic endometritis). Uterine artery Doppler parameters were assessed, and the uterine arterial perfusion index was calculated as an integral measure of uterine arterial blood supply. Analyses were performed separately for gestational windows of 5-7@+6, 8-10@+6, and 11-13@+6 weeks. Nonparametric statistical methods with median differences and 95% confidence intervals were used. Prognostic performance was evaluated using ROC analysis.

Results. Across all first-trimester gestational windows, women in the main group demonstrated lower uterine arterial perfusion index values compared with the comparison group. The most pronounced differences were observed at 11-13@+6 weeks of gestation, when API demonstrated the greatest magnitude of effect (AUC 0.92), exceeding that for velocity indicators and vascular resistance indices and high prognostic significance in relation to adverse outcomes in the first half of pregnancy. Resistance indices (PI, RI) were less consistent and more operator-dependent than the integral perfusion index.

Conclusion. The uterine arterial perfusion index is an informative integral parameter of uterine blood supply in the first trimester of pregnancy. A history of chronic endometritis is associated with reduced API and an unfavorable uterine hemodynamic profile. These findings support the potential use of API as a marker of early placentation conditions and for risk stratification of adverse pregnancy outcomes.

Keywords: ultrasound diagnostics; chronic endometritis; first trimester of pregnancy; uterine arteries; Doppler ultrasound; arterial perfusion index

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Ozerskaya I.A., Porkhovaty S.Ya., Kazaryan G.G., Ozhogina E.V. Predictive uterine hemodynamic parameters in the first trimester of pregnancy following treatment for chronic endometritis. *Medical Visualization*. 2026; 30 (3): 97-108. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1631>

Received: 18.01.2026.

Accepted for publication: 02.04.2026.

Published online: 30.09.2026.

Введение

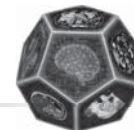
Нарушения ранних этапов беременности, включая неразвивающуюся беременность и самопроизвольное прерывание в первой половине гестации, остаются одной из актуальных проблем репродуктивной медицины. Существенная роль в формировании неблагоприятных исходов отводится нарушениям процессов имплантации и ранней плацентации, в основе которых лежат изменения эндометриальной рецептивности и маточно-плацентарной гемодинамики [1-3].

Хронический эндометрит (ХЭ) рассматривается как одно из состояний, способных негативно влиять на рецептивность эндометрия, процессы децидуализации и последующее формирование плацентарной площадки. ХЭ нарушает процесс децидуализации стромальных клеток, вследствие чего страдает имплантация. Патофизиологические механизмы ремоделирования спиральных артерий до сих пор остаются недостаточно изученными. Данные литературы свидетельствуют, что как избыточная, так и недостаточная васкуляризация эндометрия может приводить к нарушению имплантации и, таким образом, развитию беременности [4, 5]. Изменения кровоснабжения эндометрия наступают вследствие неравномерной сосудистой плотности, расширения просвета сосудов и тромбозов, что снижает так называемый резерв эндометриального потока, приводящий к рецидивирующим ранним выкидышам [4]. Это связано с тем, что после проведенного комплексного ле-

чения ХЭ могут оставаться стойкие функциональные нарушения микроциркуляции и регуляции сосудистого тонуса [6, 7], что потенциально отражается на условиях раннего развития беременности.

Допплерометрическая оценка маточных артерий традиционно используется для анализа сосудистого сопротивления (PI, RI), однако данные параметры характеризуют преимущественно сопротивление кровотоку и не отражают объемного артериального притока к матке. В последние годы появились методики исследования кровотока в плаценте, основанные на показателях объемных индексов васкуляризации (VI, FI, VFI) [8-10], было проведено пилотное исследование на фантоме с целью получения множественных трехмерных объемов сосудистой сети плаценты с отслеживанием точного пространственного положения датчика инфракрасной камерой с последующей автоматической реконструкцией всей плаценты [11]. Однако эти методики требуют дополнительных опций, объемных датчиков, включая полостные, что не всегда имеется у врача УЗИ.

В связи с этим перспективным представляется использование стандартного оборудования и оценка совокупных показателей доплерографии маточных артерий (МА), клинических, лабораторных данных [12] или объединяющих скоростные и объемные характеристики кровотока МА. Индекс артериальной перфузии (ИАП) матки, рассчитываемый на основании суммарного объемного кровотока по МА с учетом объема матки, может рассматриваться



как интегральный показатель артериального кровоснабжения беременной матки и потенциальный маркер условий ранней плацентации.

Цель исследования: оценить возможности использования ИАП и доплерометрических параметров маточных артерий для выявления нарушений маточного кровоснабжения в I триместре беременности у пациенток с перенесенным хроническим эндометритом и определения их прогностической значимости неблагоприятных исходов первой половины гестации.

Материал и методы

Проведено ретроспективное сравнительное когортное исследование 401 беременной, из которых у 137 в анамнезе был диагностирован ХЭ с последующим комплексным лечением; эти пациентки составили основную группу и им провели 208 ультразвуковых исследований.

Группа сравнения была сформирована из 264 беременных с отсутствием указания на воспалительный процесс слизистой оболочки полости матки в анамнезе, которым провели 324 ультразвуковых исследования.

В обеих группах были сформированы гестационные интервалы 5–7⁺⁶, 8–10⁺⁶ и 11–13⁺⁶ нед (далее 5–7, 8–10 и 11–13 нед соответственно), часть пациенток была осмотрена повторно в разные сроки (табл. 1). У всех беременных проводили измерение объема тела матки, диаметра обеих МА и их доплерографическую оценку.

Критериями исключения являлась многоплодная беременность, миома матки диаметром более 20 мм, кисты и опухоли яичников, а также гидросальпинкс.

Все обследованные подписали добровольное информированное согласие на публикацию своих данных.

Ультразвуковое обследование беременных проводилось на аппарате Affiniti70 (Philips, Нидерланды)

трансабдоминальным (ТА) и трансвагинальным (ТВ) доступом с применением мультисекторных датчиков 5–1 МГц (ТА) и 9–3 МГц (ТВ) по общепринятой методике, рекомендованной ISUOG [13].

С целью минимизации неблагоприятного воздействия на эмбрион строго придерживались правил проведения доплерографии в I триместре: тепловой индекс 0,3–0,5, время исследования не превышало 5 мин и рамка цветового картирования располагалась по ребрам матки, не затрагивая эмбрион [14], что в соответствии с заявлением ISUOG является безопасным в эмбриональном периоде [15].

При импульсно-волновой доплерографии МА исследовали такие показатели, как максимальная скорость кровотока (V_{max}), конечно-диастолическая скорость (V_{min}), средняя скорость (V_{mean}), пульсационный индекс (PI) и индекс резистентности (RI) (рис. 1), а также измеряли диаметр МА в месте расположения метки контрольного объема. Для повышения точности измерения диаметра МА изображение увеличивали и калиперы устанавливали на границы цветового контура сосуда (рис. 2). Результат учитывали, включая сотые доли сантиметра.

Объем матки ($V_{матки}$) измеряли в сагитальном сечении от области внутреннего зева до наиболее удаленной точки дна (длина); перпендикулярно линии измерения длины по наиболее удаленным точкам передней и задней стенкам (толщина); изменив плоскость сканирования на 90° по наиболее удаленным точкам боковых поверхностей матки, получали значение ширины (рис. 3, 4). Используя программное обеспечение ультразвукового сканера, рассчитывался объем матки вместе с эмбрионом (плодом) по формуле:

$$V_{матки} = A \times B \times C \times 0,523,$$

где A – длина, B – толщина, C – ширина тела матки, 0,523 – коэффициент.

Таблица 1. Распределение пациенток и ультразвуковых исследований по группам и гестационным срокам

Table 1. Distribution of patients and ultrasound examinations by study groups and gestational age windows

Срок гестации, нед Gestational age window, weeks	Группа Group	Число пациенток Number of patients	Число исследований Number of examinations
5–7 5–7	Основная / Main group Сравнения / Comparison group	61 58	70 60
8–10 8–10	Основная / Main group Сравнения / Comparison group	45 30	47 30
11–13 11–13	Основная / Main group Сравнения / Comparison group	90 232	91 234

Примечание. Число пациенток по гестационным срокам не суммируется вследствие повторных визитов.

Note. The number of patients across gestational age windows is not additive due to repeated visits.

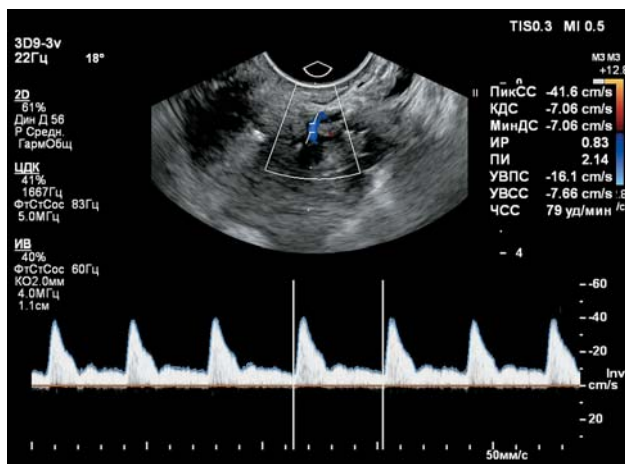
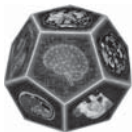


Рис. 1. Спектральная доплерография маточной артерии у беременной в сроке 5⁺¹ нед: тепловой индекс 0,3; цветовая рамка расположена по ребру матки, не затрагивая эмбрион; угол инсонации составляет 18°; после автоматической обводки спектра кровотока на экране появляются цифровые значения $V_{\max}$ 41,6 см/с, $V_{\min}$ 7,1 см/с, V_{mean} 7,7 см/с, RI 0,83, PI 2,14.

Fig. 1. Spectral Doppler assessment of the uterine artery in a pregnant woman at 5⁺¹ weeks of gestation: thermal index 0.3; the color Doppler box is positioned along the uterine margin without involving the embryo; the angle of insonation is 18°. After automatic tracing of the Doppler waveform, the following parameters are displayed on the screen: $V_{\max}$ 41.6 cm/s, $V_{\min}$ 7.1 cm/s, V_{mean} 7.7 cm/s, RI 0.83, PI 2.14.

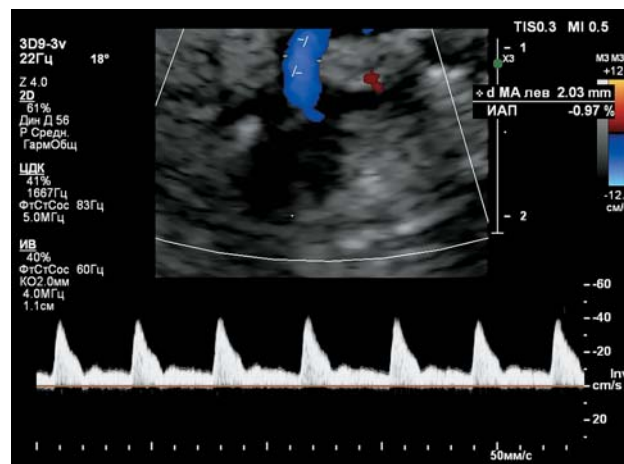


Рис. 2. Измерение диаметра маточной артерии этой же пациентки: использовано увеличение изображения, измерение проведено на уровне расположения контрольного объема по цветовому контуру маточной артерии, диаметр составляет 2,0 мм, ИАП 0,97% (автоматический расчет).

Fig. 2. Measurement of the uterine artery diameter in the same patient: image magnification was applied; the measurement was performed at the level of the color Doppler sample volume along the contour of the uterine artery; the diameter is 2.0 mm; uterine arterial perfusion index (API) 0.97% (automatic calculation).



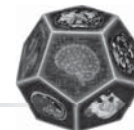
Рис. 3. Сагиттальное сечение матки, трансабдоминальное сканирование, беременность 7⁺⁵ нед: визуализируется область внутреннего зева, четко определяются контур дна матки, передняя и задняя стенки для измерения длины и толщины тела матки.

Fig. 3. Sagittal section of the uterus, transabdominal ultrasound, pregnancy at 7⁺⁵ weeks of gestation: the region of the internal cervical os is visualized; the contour of the uterine fundus as well as the anterior and posterior uterine walls are clearly delineated for measurement of uterine body length and thickness.



Рис. 4. Горизонтальное сечение матки, трансабдоминальное сканирование, та же пациентка: измерение ширины тела матки, которая составляет 5,1 см, объем тела матки 94,1 см³.

Fig. 4. Transverse section of the uterus, transabdominal ultrasound, same patient: measurement of uterine body width, which is 5.1 cm; uterine body volume 94.1 cm³.



В дальнейшем определяли ИАП, который отражает перфузию 1 см³ тела матки вместе с беременностью, кровью, поступающей по обеим МА, выраженный в процентах. Для этого вычисляли объемный кровоток (см³ за один сердечный цикл) в каждой из МА по следующей формуле:

$$V_{vol} = V_{mean} \times S,$$

где S – площадь маточной артерии (см²). ИАП вычисляется по формуле:

$$\text{ИАП (\%)} = (V_{vol} \text{МА}_{\text{правая}} + V_{vol} \text{МА}_{\text{левая}}) / V_{\text{матки}} \times 100,$$

где $V_{vol} \text{МА}_{\text{правая}}$ – объемный кровоток по правой МА (см³); $V_{vol} \text{МА}_{\text{левая}}$ – объемный кровоток по левой МА (см³); $V_{\text{матки}}$ – объем матки (см³).

Статистическая обработка

Полученные результаты обрабатывались стандартными статистическими методами с применением программного обеспечения проекта R для статистических вычислений, версия R 4.3.2 (Eye Holes) [16]. Количественные показатели оценивали на предмет нормальности распределения; в связи с ненормальным распределением большинства параметров данные представлены в виде медианы (Me) и межквартильного размаха [Q1; Q3].

Сравнение количественных показателей между группами выполняли с использованием непараметрического критерия Манна-Уитни отдельно для каждого гестационного срока, а для бинарных показателей применяли точный критерий Фишера. Для оценки величины эффекта различий непрерывных показателей рассчитывали разность медиан с 95%

доверительным интервалом (ДИ), полученным методом бутстрэп-перестановок. С целью коррекции множественных сравнений внутри каждого гестационного срока применяли поправку Бенджамини-Хохберга с контролем уровня ложных открытий (FDR). Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Прогностическую значимость показателей оценивали методом ROC-анализа с определением площади под кривой (AUC) и оптимальных пороговых значений по индексу Юдена; 95% ДИ рассчитывали методом бутстрэп-перестановок (не менее 2000 повторов). Дополнительно применяли многофакторный логистический регрессионный анализ с расчетом отношения шансов (OR) и 95% ДИ, с коррекцией на повторные наблюдения и сравнением качества моделей по критерию Акаике (AIC) и AUC.

Влияние фактора оператора при повторных ультразвуковых исследованиях оценивали с использованием многофакторных регрессионных моделей, включающих гестационный срок и принадлежность к группе с учетом внутрисубъектной корреляции данных.

Результаты исследования

Анализируя анамнестические данные, следует отметить, что между группами статистически значимой разницы по возрасту и частоте наступления беременности после ЭКО не выявлено ($p > 0,05$), но потеря беременности (неразвивающаяся или самопроизвольный выкидыш) в течение первых 5–20 нед гестации у пациенток с перенесенным ХЭ в анамнезе наблюдалась гораздо чаще ($p < 0,001$) (табл. 2).

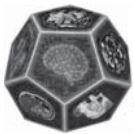
Таблица 2. Клиническая характеристика пациенток основной группы и группы сравнения

Table 2. Clinical characteristics of patients in the main group and the comparison group

Показатель Parameter	Основная группа Main group n = 137	Группа сравнения Comparison group n = 264	p
Возраст, годы Me [Q1; Q3] Age, years Me [Q1; Q3]	33.0 [29.0; 36.2]	33.0 [30.0; 37.0]	0.538
Беременность после ЭКО, n (%) Pregnancy after IVF, n (%)	12 (8.8%)	38 (14.4%)	0.114
Потеря беременности до 20 нед, n (%) Pregnancy loss before 20 weeks, n (%)	44 (32.1%)	4 (1.5%)	<0.001

Примечание. Анализ выполнен на уровне пациенток (уникальные ID); при наличии повторных ультразвуковых визитов у одной пациентки в анализ включали один раз (для бинарных исходов – наличие события хотя бы в одном визите). Me [Q1; Q3] – медиана и межквартильный размах. Межгрупповое сравнение возраста проводили критерием Манна-Уитни; для бинарных показателей использовали точный критерий Фишера.

Note. The analysis was performed at the patient level (unique IDs); in the presence of repeated ultrasound visits, each patient was included once (for binary outcomes, the occurrence of the event at least once was considered). Me [Q1; Q3] – median and interquartile range. Between-group comparison of age was performed using the Mann-Whitney U test; Fisher's exact test was used for binary variables.



Маточная гемодинамика в I триместре беременности

Несмотря на наличие асимметрии доплерометрических показателей кровотока в правой и левой МА, статистически значимых различий между ними выявлено не было ($p > 0,05$); в связи с этим, а также в соответствии с рекомендациями ISUOG [13] для дальнейшего анализа использовали усредненные значения показателей.

Во всех гестационных сроках I триместра у пациенток с перенесенным ХЭ выявлены статистически значимые различия параметров маточной гемодинамики по сравнению с группой без данного анамнестического фактора (табл. 3).

Интегральный показатель артериальной перфузии матки (ИАП) во всех сроках был ниже у пациенток с перенесенным ХЭ, при этом выраженность различий нарастала с увеличением срока беременности и достигала максимума в 11–13 нед. В данном гестационном сроке разность медиан ИАП между группами составила $-0,33$ (95% ДИ $-0,42$; $-0,24$).

Средняя скорость кровотока (V_{mean}) в МА также была снижена у пациенток основной группы в течение I триместра беременности, наиболее выражено – в сроке 11–13 нед. Различия по скоростным характеристикам сохранялись даже в тех сроках, где показатели сосудистого сопротивления не демонстрировали статистической значимости.

Индексы сосудистого сопротивления (PI и RI) в раннем гестационном сроке 5–7 нед были выше у пациенток основной группы, в 8–10 нед различия по PI и RI носили менее устойчивый характер, что может быть связано с недостаточным количеством пациенток этого срока гестации, тогда как в сроке 11–13 нед вновь достигали статистической значимости.

Следует отметить, что наличие протодиастолической выемки не является патологией для I триместра, но нулевая конечно-диастолическая скорость отражается на показателях уголнезависимых индексов (PI, RI), которые становятся высокими, а также V_{mean} , значение которого снижается. В конечном итоге происходит снижение ИАП, имеющего зависимость от V_{mean} .

Таким образом, на протяжении всего I триместра у пациенток с перенесенным ХЭ формировался менее благоприятный профиль артериальной гемодинамики матки, наиболее отчетливо проявляющийся по интегральному показателю артериальной перфузии.

Прогностическая значимость показателей маточной гемодинамики

При анализе прогностической значимости параметров маточной гемодинамики в отношении неблагоприятного исхода беременности (прерывание или неразвивающаяся) в первой половине гестации (до 20 нед) наибольшую диагностическую ценность продемонстрировал ИАП матки (табл. 4).

В раннем гестационном сроке (5–7 нед) ИАП характеризовался хорошей прогностической способностью (AUC 0,76), при этом пороговое значение $\leq 0,56$ ассоциировалось с повышенным риском неблагоприятного исхода. Сопоставимые, но несколько менее выраженные характеристики показала средняя скорость кровотока (V_{mean}).

В сроке 11–13 нед прогностическая значимость ИАП была максимальной (AUC 0,92), превосходя таковую для скоростных показателей и индексов сосудистого сопротивления,

Индексы PI и RI демонстрировали умеренную прогностическую ценность преимущественно в поздних сроках I триместра и уступали интегральному показателю артериальной перфузии.

В многофакторных логистических моделях с кластеризацией по пациентке (учет повторных визитов) и поправкой на гестационное окно и принадлежность к группе ИАП демонстрировал наилучшие прогностические характеристики в отношении потерь беременности до 20 нед при использовании критерия Акаике (AIC), который имел наименьшее значение. ИАП сохранял независимую ассоциацию с риском потери беременности (OR 0,16; 95% ДИ 0,04–0,72; $p = 0,017$). Отдельные доплерометрические показатели (V_{mean} , PI, RI) обладали меньшей прогностической ценностью; добавление PI или RI к модели с ИАП не улучшало ее качество.

Оценка влияния оператора ультразвукового исследования

Анализ распределения ультразвуковых исследований между операторами выявил их неоднородность по гестационным срокам. В связи с этим влияние оператора оценивали с использованием многофакторного регрессионного анализа с учетом гестационного срока и принадлежности к основной группе или группе сравнения, а также с коррекцией на повторные наблюдения у одной пациентки (кластеризация по идентификатору пациентки).

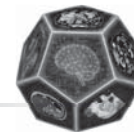


Таблица 3. Показатели гемодинамики, объема матки и диаметра маточных артерий в I триместре гестации

Table 3. Hemodynamic parameters, uterine volume, and uterine artery diameter in the first trimester of pregnancy

Показатель Parameter	Основная группа Main group	Группа сравнения Comparison group	p	q (FDR)
5-7 нед / 5-7 weeks				
	n = 70	n = 60		
Объем матки, см ³ Uterine volume, cm ³	117.9 [95.5; 151.7]	116.9 [93.8; 150.8]	0.994	0.944
Диаметр МА, см Uterine artery diameter, cm	0.25 [0.22; 0.27]	0.26 [0.23; 0.30]	0.003	0.009
ИАП, % Arterial perfusion index, %	0.55 [0.40; 0.75]	0.85 [0.66; 1.15]	<0.001	<0.001
V _{mean} , см/с (cm/s)	7.6 [5.3; 9.3]	8.8 [7.2; 12.0]	0.003	0.009
V _{max} , см/с (cm/s)	49.7 [42.9; 57.7]	54.5 [39.7; 59.4]	0.657	0.751
V _{min} , см/с (cm/s)	4.8 [3.5; 8.0]	6.7 [4.6; 8.6]	0.064	0.089
PI	2.74 [2.39; 3.31]	2.45 [2.15; 2.91]	0.011	0.021
RI	0.89 [0.85; 0.93]	0.87 [0.83; 0.90]	0.025	0.039
8-10 нед / 8-10 weeks				
	n = 47	n = 30		
Объем матки, см ³ Uterine volume, cm ³	195.2 [143.7; 234.9]	192.9 [160.2; 235.0]	0.504	0.503
Диаметр МА, см Uterine artery diameter, cm	0.27 [0.25; 0.29]	0.28 [0.26; 0.32]	0.136	0.218
ИАП, % Arterial perfusion index, %	0.55 [0.38; 0.75]	0.85 [0.59; 1.03]	0.001	0.009
V _{mean} , см/с (cm/s)	8.3 [6.7; 11.8]	11.4 [8.0; 14.8]	0.006	0.024
V _{max} , см/с (cm/s)	58.6 [48.0; 66.8]	60.1 [48.9; 80.1]	0.275	0.314
V _{min} , см/с (cm/s)	6.3 [3.8; 10.1]	8.4 [6.0; 13.6]	0.069	0.184
PI	2.62 [2.23; 3.31]	2.31 [2.07; 2.86]	0.135	0.218
RI	0.87 [0.84; 0.92]	0.86 [0.81; 0.90]	0.187	0.246
11-13 нед / 11-13 weeks				
	n = 91	n = 234		
Объем матки, см ³ Uterine volume, cm ³	424.4 [343.5; 530.2]	383.3 [311.3; 468.5]	0.003	0.003
Диаметр МА, см Uterine artery diameter, cm	0.30 [0.27; 0.34]	0.31 [0.29; 0.34]	0.040	0.040
ИАП, % Arterial perfusion index, %	0.47 [0.37; 0.65]	0.80 [0.60; 1.13]	<0.001	<0.001
V _{mean} , см/с (cm/s)	15.4 [11.7; 18.5]	20.2 [16.0; 25.4]	<0.001	<0.001
V _{max} , см/с (cm/s)	73.0 [59.5; 85.5]	82.4 [68.7; 95.7]	<0.001	<0.001
V _{min} , см/с (cm/s)	15.9 [12.0; 20.8]	22.6 [17.9; 29.2]	<0.001	<0.001
PI	1.86 [1.55; 2.23]	1.56 [1.33; 1.88]	<0.001	<0.001
RI	0.78 [0.71; 0.82]	0.72 [0.66; 0.77]	<0.001	<0.001

Примечание. Ме [Q1;Q3] – медиана и межквартильный размах; p – двусторонний критерий Манна-Уитни внутри каждого срока; q (FDR) – поправка Бенджамини-Хохберга внутри каждого срока по набору показателей,

Note. Data are presented as Me [Q1; Q3] – median and interquartile range; p – two-sided Mann-Whitney U test within each gestational window; q (FDR) – Benjamini-Hochberg correction for multiple comparisons within each gestational window across the set of parameters.

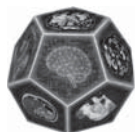


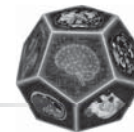
Таблица 4. Диагностическая ценность основных параметров маточной гемодинамики в прогнозировании неблагоприятных исходов беременности в первой половине гестации

Table 4. Diagnostic performance of key uterine hemodynamic parameters in predicting adverse pregnancy outcomes in the first half of gestation

Показатель Parameter	AUC	Пороговое значение Cut-off value	Направление риска Risk direction	Se	Sp
5–7 нед; n = 130, потеря беременности 26 (20,0%) 5–7 weeks; n = 130, pregnancy losses 26 (20.0%)					
ИАП, % API, %	0.761 (0.654–0.853)	0.56	< порог < cut-off	0.73	0.73
V_{mean} , см/с (cm/s)	0.717 (0.606–0.814)	8.2	< порог < cut-off	0.85	0.56
PI	0.532 (0.406–0.649)	2.52	> порог > cut-off	0.65	0.47
RI	0.528 (0.409–0.649)	0.89	> порог > cut-off	0.50	0.63
8–10 нед; n = 77, потеря беременности 10 (13,0%) 8–10 weeks; n = 77, pregnancy losses 10 (13.0%)					
ИАП, % API, %	0,761 (0,576–0,915)	0,56	< порог < cut-off	0,80	0,66
V_{mean} , см/с (cm/s)	0,675 (0,471–0,867)	7,9	< порог < cut-off	0,70	0,69
PI	0,540 (0,351–0,727)	3,34	> порог > cut-off	0,40	0,82
RI	0,569 (0,393–0,749)	0,86	> порог > cut-off	0,80	0,46
11–13 нед; n = 325, потеря беременности 12 (3,7%) 11–13 weeks; n = 325, pregnancy losses 12 (3.7%)					
ИАП, % API, %	0,921 (0,858–0,976)	0,53	< порог < cut-off	1,00	0,75
V_{mean} , см/с (cm/s)	0,847 (0,744–0,934)	14,2	< порог < cut-off	0,83	0,79
PI	0,766 (0,585–0,888)	1,86	> порог > cut-off	0,92	0,69
RI	0,732 (0,542–0,876)	0,74	> порог > cut-off	0,92	0,52

Примечание. ROC-анализ: площадь под кривой (AUC) и 95% ДИ рассчитаны методом бутстрэп-перестановок (2000 повторов); оптимальный порог определяли по максимальному значению индекса Юдена; направление риска – выше или ниже порогового значения; Se – чувствительность; Sp – специфичность.

Note. ROC analysis: the area under the curve (AUC) and 95% confidence intervals were calculated using bootstrap resampling (2000 iterations); optimal cut-off values were determined by maximizing the Youden index. Risk direction indicates whether values above or below the cut-off are associated with increased risk. Se – sensitivity; Sp – specificity.



После указанной статистической коррекции влияние оператора на значения ИАП оказалось статистически незначимым ($p > 0,05$). В то же время для индексов сосудистого сопротивления (PI и RI) сохранялся статистически значимый вклад фактора оператора, что свидетельствует о большей чувствительности традиционных доплерометрических параметров к методическим особенностям измерения.

Обсуждение

Оценка состояния кровотока матки в I триместре беременности является актуальной проблемой, так как до 95% выкидышей или последующих нарушений маточно-плацентарного кровотока приходится на первые 12 нед гестации [17]. Исследование кровотока в МА проводится с конца XX века и входит в состав всех скрининговых сроков [18].

Роль ХЭ в формировании нарушений нидации и репродуктивных потерь подробно рассмотрена в монографиях и обзорах отечественных авторов [19, 20], а также в ряде зарубежных исследований [21, 22].

С патофизиологической точки зрения влияние перенесенного ХЭ на маточную гемодинамику ранних сроков беременности может быть обусловлено комплексом факторов. К ним относятся персистирующие иммуновоспалительные изменения эндометрия, дисрегуляция ангиогенных и вазоактивных факторов, а также нарушения микроциркуляции в зоне предполагаемой плацентарной площадки [23]. В связи с этим доплерометрия МА широко применяется как инструмент оценки риска плацентарно-ассоциированных осложнений.

Результаты настоящего исследования демонстрируют, что изменения маточной артериальной гемодинамики в I триместре беременности отражают нарушения процессов нидации и ранней плацентации, особенно выраженные у пациенток с перенесенным ХЭ. Полученные данные согласуются с концепцией “дефектной глубокой плацентации”, в основе которой лежит недостаточная трансформация спиральных артерий и ограничение маточно-плацентарной перфузии [24].

Выявление гемодинамических различий уже в сроке 5–7 нед беременности указывает на возможное влияние ХЭ на самые ранние этапы формирования плацентарного русла. Максимальная выраженность различий и высокая прогностическая значимость ИАП в сроке 11–13 нед соответствуют периоду активного ремоделирования спиральных артерий и клинически значимому окну оценки плацентации, что хорошо согласуется с данными как зарубежных, так и отечественных исследований [1, 21, 19, 24].

Из проведенного исследования следует, что традиционные доплерометрические параметры (PI, RI,

V_{mean}) чувствительны к локальным изменениям спектра кровотока и методическим особенностям измерения. В частности, отсутствие конечной диастолической скорости ($V_{min} = 0$) сопровождалось ожидаемым повышением индексов сосудистого сопротивления и снижением V_{mean} , что ранее описывалось как проявление выраженного повышения периферического сопротивления в МА [25], отражающего нарушение ремоделирования спиральных артерий в ранние сроки беременности.

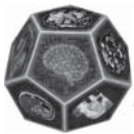
Вместе с тем, несмотря на выраженное влияние нулевой конечно-диастолической скорости на спектральные характеристики кровотока, данный признак не продемонстрировал самостоятельной прогностической значимости в отношении потерь беременности. Это свидетельствует о том, что изолированный анализ отдельных элементов доплеровского спектра не всегда позволяет адекватно оценить совокупное артериальное кровоснабжение беременной матки и его клиническое значение.

Принципиально иным оказался вклад ИАП матки, который в настоящем исследовании продемонстрировал устойчивую и независимую ассоциацию с неблагоприятными исходами беременности. В отличие от PI и RI, ИАП интегрирует скоростные и геометрические характеристики кровотока по обеим маточным артериям и отражает суммарный объемный приток крови к матке, что приближает его к функциональной оценке условий ранней плацентации. Именно этим, вероятно, объясняется более устойчивая способность ИАП к различиям между группами в течение I триместра и его высокая прогностическая значимость.

В многофакторных логистических моделях ИАП сохранял статистически значимую связь с риском потери беременности, тогда как добавление отдельных доплерометрических параметров (PI, RI, V_{mean}) не улучшало качество моделей. Сравнение моделей по критерию Акаике показало преимущество сочетания с ИАП, что подчеркивает его диагностическую и прогностическую ценность.

Особого внимания заслуживает выявленная низкая операторозависимость ИАП. В отличие от традиционных резистивных индексов, для которых сохранялось влияние фактора оператора, значения ИАП не отражали статистически значимых межоператорских различий. Это имеет важное практическое значение и согласуется с современными требованиями к воспроизводимости количественных ультразвуковых методов [13].

Следует отметить, что в доступной литературе отсутствуют исследования, посвященные применению интегральных показателей артериальной перфузии матки у беременных в I триместре. Большинство работ фокусируется либо на плацентар-



ной васкуляризации, либо на изолированной доплерометрии МА [8, 9, 14]. В этом контексте использование ИАП позволяет расширить представления о функциональной оценке ранних этапов плацентации и дополнить существующие ультразвуковые подходы.

Таким образом, полученные данные подтверждают, что ИАП отражает не только локальные изменения кровотока, но и интегральное состояние артериального кровоснабжения беременной матки, что делает его перспективным маркером нарушений плацентации и ранней плацентации, особенно у пациенток с неблагоприятным репродуктивным анамнезом, включая ХЭ.

Отдельного обсуждения заслуживает взаимосвязь ИАП с ростом матки и изменением параметров маточного кровотока в I триместре. В группе сравнения, несмотря на увеличение диаметра МА и рост средних скоростей кровотока (V_{mean}), значения ИАП оставались относительно стабильными в различные сроки I триместра. Это наблюдение представляется физиологически обоснованным, поскольку в ранние сроки гестации возрастает не столько “удельная” артериальная перфузия ткани матки, сколько абсолютный объемный кровоток, необходимый для обеспечения растущего органа. Увеличение маточного кровоснабжения реализуется преимущественно за счет дилатации МА и роста V_{mean} ; одновременно увеличивается объем (масса) перфузируемой ткани, что приводит к относительной компенсации при расчете интегрального показателя и объясняет отсутствие выраженного повышения ИАП в динамике в группе сравнения.

В этом контексте ИАП следует рассматривать как показатель, отражающий “перфузию на единицу объема ткани”, а не абсолютный приток крови. Именно поэтому при физиологическом росте матки стабильные значения ИАП сочетаются с увеличением диаметра МА и ростом V_{mean} . Такой подход принципиально важен для клинической интерпретации: снижение ИАП у пациенток с перенесенным ХЭ по сравнению с группой сравнения указывает на недостаточность адаптационных механизмов маточного кровоснабжения (дилатации и/или увеличения скоростей кровотока) относительно потребностей растущей матки, что потенциально связано с нарушениями ранней плацентации и повышением риска неблагоприятных исходов беременности.

Следует подчеркнуть, что ИАП формируется как результат сложного соотношения между абсолютным объемным кровотоком и объемом перфузируемой ткани матки и не может быть интерпретирован как прямое отражение какого-либо одного доплерометрического параметра. В зависимости от комбинации анатомических и гемодинамических харак-

теристик сходные значения ИАП могут наблюдаться при принципиально различных вариантах маточного кровообращения. Так, относительное снижение ИАП возможно как при адекватных скоростных показателях кровотока на фоне увеличенного объема матки, так и при нормальных размерах матки в условиях недостаточного увеличения диаметра МА или снижения средних скоростей кровотока. Аналогично сохранные значения ИАП могут сочетаться с уменьшенными размерами матки при снижении абсолютного объемного кровотока, что отражает относительную компенсацию перфузии на единицу объема ткани.

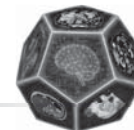
Таким образом, ИАП отражает не абсолютную интенсивность маточного кровоснабжения, а степень соответствия артериального притока метаболическим потребностям растущей матки. Именно эта особенность объясняет стабильность значений ИАП в группе сравнения в I триместре на фоне увеличения объемного кровотока и подчеркивает его диагностическую значимость при патологических состояниях, сопровождающихся нарушением адаптационных механизмов маточной гемодинамики. В связи с этим снижение ИАП у пациенток с перенесенным ХЭ следует рассматривать как маркер несоразмерности между растущими потребностями матки и ограниченными возможностями артериального притока, даже при отсутствии выраженных изменений отдельных доплерометрических параметров.

Использование ИАП, рассчитываемого на основе стандартной доплерометрии МА без применения дополнительного оборудования, представляет собой методически простой и воспроизводимый подход к интегральной оценке маточного кровоснабжения при беременности I триместра.

Ограничения и перспективы

К ограничениям исследования относятся ретроспективный характер анализа, ограниченное число неблагоприятных исходов в отдельных гестационных сроках и отсутствие прямой морфологической или биохимической верификации плацентарной дисфункции. Вместе с тем сильной стороной работы являются использование клинически интерпретируемых мер эффекта, учет внутрисубъектной корреляции при повторных измерениях и анализ влияния оператора исследования.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются проспективная валидация ИАП у беременных, оценка его добавочной прогностической ценности в составе комбинированных моделей раннего скрининга и анализ динамики ИАП в процессе формирования маточно-плацентарного кровообращения.



Заключение

У пациенток с перенесенным хроническим эндометритом в анамнезе в I триместре беременности формируется менее благоприятный профиль маточной артериальной гемодинамики по сравнению с группой сравнения, что проявляется снижением ИАП матки и неблагоприятными изменениями скоростных и резистентных параметров кровотока.

ИАП продемонстрировал наибольшую диагностическую и прогностическую значимость среди изученных параметров и позволил выявить относительную недостаточность маточного кровоснабжения, не всегда отражаемую отдельными доплерометрическими показателями. Стабильность значений ИАП в группе сравнения на фоне роста абсолютного объемного кровотока подчеркивает его роль как показателя удельной перфузии, отражающего баланс между артериальным притоком и объемом перфузируемой ткани.

Меньшая операторозависимость ИАП по сравнению с традиционными доплерометрическими индексами повышает его воспроизводимость и клиническую информативность. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования ИАП в качестве интегрального ультразвукового маркера условий ранней плацентации и обосновывают необходимость дальнейших проспективных исследований для определения его места для ранней стратификации риска неблагоприятных исходов беременности.

Участие авторов

Озерская И.А. – концепция и дизайн исследования, анализ и интерпретация полученных данных, подготовка и редактирование текста, утверждение окончательного варианта статьи.

Порховатый С.Я. – проведение исследования, обзор публикаций по теме статьи.

Казарян Г.Г. – участие в научном дизайне, проведение исследования, сбор и обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, обзор публикаций по теме статьи, написание текста, подготовка, создание опубликованной работы.

Ожогина Е.В. – статистическая обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, ответственность за целостность всех частей статьи.

Authors' participation

Ozerskaya I.A. – concept and design of the study, analysis and interpretation of the obtained data, text preparation and editing, approval of the final version of the article.

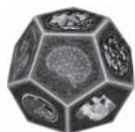
Porkhovaty S.Ya. – conducting research, review of publications.

Kazaryan G.G. – participation in scientific design, conducting research, collection and analysis of data, analysis and interpretation of the obtained data, review of publications, writing text, preparation and creation of the published work.

Ozhogina E.V. – statistical analysis, analysis and interpretation of the obtained data, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Список литературы [References]

1. Espinoza J., Romero R., Mee Kim Y. et al. Normal and abnormal transformation of the spiral arteries during pregnancy. *J. Perinat. Med.* 2006; 34 (6): 447–458. <https://doi.org/10.1515/JPM.2006.089>
2. Degner K., Magness R.R., Shah D.M. Establishment of the Human Uteroplacental Circulation: A Historical Perspective. *Reprod. Sci.* 2017; 24 (5): 753–761. <https://doi.org/10.1177/1933719116669056>
3. Brosens I., Pijnenborg R., Vercruyssen L., Romero R. The “Great Obstetrical Syndromes” are associated with disorders of deep placentation. *Am. J. Obstet. Gynecol.* 2011; 204 (3): 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2010.08.009>
4. Buzzaccarini G., Vitagliano A., Andrisani A. et al. Chronic endometritis and altered embryo implantation: a unified pathophysiological theory from a literature systematic review. *J. Assist. Reprod. Genet.* 2020; 37 (12): 2897–2911. <https://dx.doi.org/10.1007/s10815-020-01955-8>
5. Zhang L., Liu J., Feng X., Lash G.E., Unraveling the mysteries of spiral artery remodeling. *Placenta.* 2023; 141: 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.placenta.2023.05.013>
6. Толибова Г.Х., Траль Т.Г., Коган И.Ю., Олина А.А. Эндометрий. Атлас. М.: Редакция журнала StatusPraesens, 2022. 184 с.
Tolibova G.Kh., Tral T.G., Kogan I.Yu., Olina A.A. Endometrium. Atlas. M.: Editorial office of the magazine StatusPraesens, 2022. 184 p. (In Russian)
7. Толибова Г.Х., Траль Т.Г. Хронический эндометрит – затянувшаяся дискуссия. *Уральский медицинский журнал.* 2023; 22 (2): 142–152. <https://doi.org/10.52420/2071-5943-2023-22-2-142-152>
8. Tolibova G.Kh., Tral T.G. Chronic endometritis – a protracted discussion. *Ural Medical Journal.* 2023; 22 (2): 142–152. <https://doi.org/10.52420/2071-5943-2023-22-2-142-152> (In Russian)
9. Schiffer V.M.M.M., Pellaers D., Hoenen J.L.J.M. et al. Feasibility of three dimensional power Doppler ultrasonography methods to assess placental perfusion. *Eur. J. Obstet. Gynecol. Reprod. Biol.* 2020; 254: 321–328. <https://doi.org/10.1016/j.ejogrb.2020.08.006>
10. Wang Y., Zheng M., Bao M., Wang H. Assessment of uteroplacental perfusion with 3D power Doppler for the early prediction of pre-eclampsia: a systematic review and meta-analysis. *Quant. Imaging Med. Surg.* 2025; 15 (10): 9765–9777. <https://doi.org/10.21037/qims-2025-158>
11. Tan S.Y., Hang F., Purvarshi G. et al. Decreased endometrial vascularity and receptivity in unexplained recurrent miscarriage patients during midluteal and early pregnancy phases. *Taiwan J. Obstet. Gynecol.* 2015; 54 (5): 522–526. <https://doi.org/10.1016/j.tjog.2014.10.008>
12. Xue A., Hanly R., Luichareonkit D. et al. Automated multivolume placental reconstruction using three-dimensional power Doppler ultrasound and infrared camera tracking. *Ultrasound Obstet. Gynecol.* 2025; 65 (5): 624–632. <https://doi.org/10.1002/uog.27708>



12. Khong S.L., Kane S.C., Brennecke S.P., da Silva Costa F. First-trimester uterine artery Doppler analysis in the prediction of later pregnancy complications. *Dis. Markers*. 2015; 2015: 679730. <https://doi.org/10.1155/2015/679730>
13. Bhide A., Acharya G., Baschat A. et al. ISUOG Practice Guidelines (updated): use of Doppler velocimetry in obstetrics. *Ultrasound Obstet. Gynecol.* 2021; 58 (2): 331-339. <https://doi.org/10.1002/uog.23698>
14. International Society of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology; Bilardo C.M., Chaoui R., Hyett J.A. et al. ISUOG Practice Guidelines (updated): performance of 11-14-week ultrasound scan. *Ultrasound Obstet. Gynecol.* 2023; 61 (1): 127-143. <https://doi.org/10.1002/uog.26106>
15. Salvesen K., Abramowicz J., Ter Haar G. et al. Board of the International Society of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology (ISUOG). ISUOG statement on the safe use of Doppler for fetal ultrasound examination in the first 13+6 weeks of pregnancy (updated). *Ultrasound Obstet. Gynecol.* 2021; 57 (6): 1020. <https://doi.org/10.1002/uog.23610>
16. A language and environment for statistical computing. Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
17. Muter J., Lynch V.J., McCoy R.C., Brosens J.J. Human embryo implantation. *Development*. 2023; 150 (10): dev201507. <https://doi.org/10.1242/dev.201507>
18. Нормальная беременность. Клинические рекомендации МЗ РФ, 2023. 90 с. Normal pregnancy. Clinical guidelines of the Russian Ministry of Health, 2023. 90 p. (In Russian)
19. Радзинский В.Е., Ордянец И.М. Хронический эндометрит. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2018. 160 с. Radzinsky V.E., Ordyanets I.M. Chronic endometritis. Moscow: GEOTAR-Media, 2018. 160 p. (In Russian)
20. Оразов М.Р., Михалева Л.М., Семенов П.А., Орехов Р.Е., Лагутина Е.В. Эффективность лечения хронического эндометрита у женщин с неудачами имплантации в анамнезе. *Трудный пациент*. 2020; 18 (8-9): 7-12. <https://doi.org/10.24411/2074-1995-2020-10053>
21. Orazov M.R., Mikhaleva L.M., Semenov P.A. et al. The effectiveness of treatment of chronic endometritis in women with a history of implantation failure. *Difficult Patient*. 2020; 18 (8-9): 7-12. <https://doi.org/10.24411/2074-1995-2020-10053> (In Russian)
22. McQueen D.B., Perfetto C.O., Hazard F.K., Lathi R.B. Pregnancy outcomes in women with chronic endometritis and recurrent pregnancy loss. *Fertil. Steril.* 2015; 104 (4): 927-931. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2015.06.044>
23. Lastinger J., Schappacher-Tilp G., Palasz N. et al. Between evidence and expectation: a retrospective cohort study on chronic endometritis in repeated implantation failure and recurrent pregnancy loss. *Reprod. Biol. Endocrinol.* 2025; 23 (1): 138. <https://doi.org/10.1186/s12958-025-01478-w>
24. Chen D.B., Magness R.R. Vascular smooth muscle cells during spiral artery remodeling in early human pregnancy. *Biol. Reprod.* 2021; 104 (2): 252-254. <https://doi.org/10.1093/biolre/iaaa220>
25. Радзинский В.Е., Оразов М.Р., Токтар Л.Р., Михалева Л.М., Силантьева Е.С., Орехов Р.Е., Семенов П.А., Лагутина Е.В. Вклад хронического эндометрита в нарушения репродуктивной системы у пациенток с повторными неудачами имплантации. *Гинекология*. 2021; 23 (1): 102-106. <https://doi.org/10.26442/20795696.2021.1.2006711-3>
26. Radzinsky V.E., Orazov M.R., Toktar L.R. et al. Contribution of chronic endometritis to reproductive system disorders in patients with repeated implantation failures. *Gynecology*. 2021; 23 (1): 102-106. <https://doi.org/10.26442/20795696.2021.1.2006711-3> (In Russian)
27. Leible S., Cumsille F., Walton R. et al. Discordant uterine artery velocity waveforms as a predictor of subsequent miscarriage in early viable pregnancies. *AJOG*. 1998; 179 (6): 1587-1593. [https://doi.org/10.1016/S0002-9378\(98\)70030-4](https://doi.org/10.1016/S0002-9378(98)70030-4)

Для корреспонденции*: Озерская Ирина Аркадиевна – e-mail: ozerskaya_usd@mail.ru

Озерская Ирина Аркадиевна – доктор мед. наук, профессор, профессор кафедры ультразвуковой диагностики факультета непрерывного медицинского образования медицинского института ФГАУ ВО "Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)" Минобрнауки России, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-8929-6001>

Порховатый Сергей Яковлевич – канд. мед. наук, врач ультразвуковой диагностики ООО "Асклепион", Москва. <https://orcid.org/0009-0002-7263-1568>

Казарян Гаяне Геворковна – канд. мед. наук, заведующая отделением ультразвуковой диагностики ООО "Медскан", Москва. <https://orcid.org/0000-0002-1198-8187>

Ожогина Екатерина Викторовна – канд. мед. наук, ведущий репродуктолог Центра репродукции и генетики "Нова клиник", Москва. <https://orcid.org/0009-0007-5205-2901>

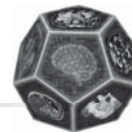
Contact*: Irina A. Ozerskaya – e-mail: ozerskaya_usd@mail.ru

Irina A. Ozerskaya – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Professor of the Department of Ultrasound Diagnostics, Faculty of Continuing Medical Education of the Medical Institute, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University), Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-8929-6001>

Sergey Ya. Porkhovaty – Cand. of Sci. (Med.), Ultrasound diagnostics doctor, LLC "Asklepion", Moscow. <https://orcid.org/0009-0002-7263-1568>

Gayane G. Kazaryan – Cand. of Sci. (Med.), Head of the department of ultrasound, LLC "Medskan", Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-1198-8187>

Ekaterina V. Ozhogina – Cand. of Sci. (Med.), Leading reproductive specialist, Nova Clinic Center for Reproduction and Genetics, Moscow. <https://orcid.org/0009-0007-5205-2901>



Позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с компьютерной томографией, с ^{18}F -фтордезоксиглюкозой в диагностике множественной миеломы

© Манукова В.А.^{1*}, Асланиди И.П.¹, Мухортова О.В.¹, Пурсанова Д.М.¹, Шурупова И.В.¹, Метелкина М.В.¹, Румянцев А.С.¹, Соловьев М.В.², Менделеева Л.П.²

¹ ФГБУ "Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева" Минздрава России; 121552 Москва, Рублевское ш., д. 135, Российская Федерация

² ФГБУ "Национальный медицинский исследовательский центр гематологии" Минздрава России; 125167 Москва, Новый Зыковский проезд, д. 4, Российская Федерация

Введение. Современная гибридная технология ПЭТ/КТ с 2-[^{18}F]фтор-2-дезоксиглюкозой (^{18}F -ФДГ) широко используется при обследовании пациентов с множественной миеломой (ММ), однако стандартизированный подход и классификация изображений ПЭТ/КТ при этом заболевании отсутствуют. Кроме того, ряд частных вопросов в оценке результатов ПЭТ/КТ требует дополнительного анализа и систематизации.

Цель исследования: изучить возможности ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ на этапе диагностики ММ.

Материал и методы. Проанализированы результаты 40 ПЭТ/КТ исследований ($n = 40$) у 40 больных ММ до начала специфического лечения. Полученные изображения оценивали визуально и полуколичественно.

Результаты. Для систематизации описания результатов ПЭТ/КТ у больных ММ выделено три типа поражения – очаговый, диффузный и диффузно-очаговый. В группе больных ММ ($n = 40$) очаговый тип поражения встречался в 72% случаев ($n = 29$), диффузный – в 13% ($n = 5$) и диффузно-очаговый – в 15% ($n = 6$) случаев. У больных с очаговым и диффузно-очаговым типами поражения – в 5% (2 из 40) случаев при ПЭТ определялись очаги костномозгового типа – с патологическим накоплением ^{18}F -ФДГ без соответствующих структурных изменений на КТ. При анализе очагов остеолитического типа выявлены существенные различия в интенсивности накопления ^{18}F -ФДГ в патологических очагах как в целом в подгруппах больных ММ с очаговым и диффузно-очаговым типами поражения, так и при анализе отдельных пациентов, в том числе в патологических очагах, соизмеримых по размерам, – значения SUL_{max} находились в диапазоне от 1,6 до 22,2. В 33% (13 из 40) случаев в группе больных ММ получены ^{18}F -ФДГ-негативные результаты ПЭТ/КТ.

Заключение. Полученные результаты свидетельствуют о существенном полиморфизме изменений, выявляемых при ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ у больных ММ на этапе диагностики. Анализ ПЭТ, КТ и совмещенной ПЭТ/КТ опций исследования позволил выделить основные типы поражения: очаговый, диффузный и диффузно-очаговый. Использование предложенной классификации позволит стандартизировать описания результатов ПЭТ/КТ и повысить точность их оценки при выполнении повторных исследований в процессе лечения.

Ключевые слова: множественная миелома; ПЭТ/КТ; ^{18}F -фтордезоксиглюкоза

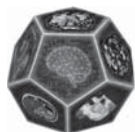
Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Манукова В.А., Асланиди И.П., Мухортова О.В., Пурсанова Д.М., Шурупова И.В., Метелкина М.В., Румянцев А.С., Соловьев М.В., Менделеева Л.П. Позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с компьютерной томографией, с ^{18}F -фтордезоксиглюкозой в диагностике множественной миеломы. *Медицинская визуализация*. 2026; 30 (3): 109-123. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1640>

Поступила в редакцию: 12.03.2026.

Принята к печати: 01.06.2026.

Опубликована online: 30.09.2026.



PET/CT with ^{18}F -fluorodeoxyglucose diagnosis of multiple myeloma

© Veronika A. Manukova^{1*}, Irakli P. Aslanidis¹, Olga V. Mukhortova¹,
Diana M. Pursanova¹, Irina V. Shurupova¹, Maria V. Metelkina¹,
Alexander S. Rumyantsev¹, Maxim V. Solovlev², Larisa P. Mendeleva²

¹ A.N. Bakulev National Medical Research Center of Cardiovascular Surgery; 135, Rublevskoye shosse, Moscow 121552, Russian Federation

² National Medical Research Center for Hematology; 4, Novy Zhykovsky proezd, Moscow 125167, Russian Federation

Background. Modern hybrid PET/CT technology with 2- ^{18}F fluoro-2-deoxy-B-glucose (^{18}F -FDG) is widely used in multiple myeloma (MM) patients. However, a number of issues in the evaluation of PET/CT results require further analysis and systematization.

Aim: To investigate the role of FDG PET/CT in the diagnostics of MM.

Materials and Methods. The analysis included the results of 40 ^{18}F -FDG PET/CT examinations performed in 40 patients with MM before therapy. To systematize the description of PET/CT findings, based on the analysis of fused images (including abnormalities on CT, PET or both) three types of lesions were identified: focal, diffuse, and diffuse-focal. The analysis included visual and semiquantitative assessment.

Results. In analyzed group (n = 40) ^{18}F -FDG PET/CT showed focal lesions in 72% (n = 29) of cases, diffuse lesions – in 13% (n = 5), and diffuse-focal lesions in 15% (n = 6). In 33% (13/40) cases PET/CT results were ^{18}F -FDG-negative – all focal lesions.

In the subgroup with focal and diffuse-focal type (n = 40), bone marrow lesions, according to ^{18}F -FDG increased uptake without corresponding structural abnormalities on CT, were detected in 5% (2/40).

In the subgroup with osteolytic foci and plasmacytomas structural lesions showed significant differences in ^{18}F -FDG uptake intensity – SUL_{max} values ranged from 1.6 to 22.2. This was observed both in the subgroups with focal and diffuse-focal type as a whole, as well as in individual patients, including lesions of comparable size.

Conclusion. The obtained results demonstrate significant polymorphism of changes detected by ^{18}F -FDG PET/CT in MM patients at the diagnostic stage. Analysis of three PET/CT types of images – PET, CT, and fused – allowed for the identification of the main types of lesions: focal, diffuse, and diffuse-focal. The use of the proposed classification will allow for the standardization of PET/CT result descriptions and increase the accuracy of their assessment during follow-up studies in the course of MM patient treatment.

Keywords: multiple myeloma; PET/CT; ^{18}F -fluorodeoxyglucose

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Manukova V.A., Aslanidis I.P., Mukhortova O.V., Pursanova D.M., Shurupova I.V., Metelkina M.V., Rumyantsev A.S., Solovlev M.V., Mendeleva L.P. PET/CT with ^{18}F -Fluorodeoxyglucose Diagnosis of Multiple Myeloma. *Medical Visualization*. 2026; 30 (3): 109-123. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1640>

Received: 12.03.2026.

Accepted for publication: 01.06.2026.

Published online: 30.09.2026.

Введение

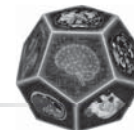
Множественная миелома (ММ), или плазмноклеточная миелома (в редакции ВОЗ 2017 г.), – это В-клеточная злокачественная опухоль, морфологическим субстратом которой являются плазматические клетки (ПК), продуцирующие моноклональный иммуноглобулин (Ig) [1]. Пролиферация злокачественных ПК в костном мозге приводит к формированию одиночных или множественных очагов остеолитического поражения. В России в 2020 г. заболеваемость ММ составила 2,0 случая на 100 тыс. населения [2].

Согласно Российским клиническим рекомендациям 2024 г., диагноз симптоматической ММ устанавливается при выявлении 10% и более ПК в костном мозге и/или плазмноклеточной инфильтрации в биопсийном материале пораженной ткани, а также одного из критериев CRAB (гиперкальциемия, почечная недостаточность, анемия, поражение кос-

тей) и/или SLiM (60% ПК в костном мозге, соотношение вовлеченных/невовлеченных свободных легких цепей сыворотки более 100, более одного очага инфильтрации костного мозга по результатам магнитно-резонансной томографии (МРТ) размером не менее 5 мм в диаметре) [3].

Одним из этих критериев CRAB является наличие в скелете одного или более очагов остеолитического поражения по результатам рентгенографии костей, компьютерной томографии (КТ) или позитронно-эмиссионной томографии, совмещенной с компьютерной томографией (ПЭТ/КТ).

По данным литературы, у 60% больных при постановке диагноза ММ определяется распространенное поражение скелета [4]. Как правило, остеодеструктивный синдром осложняется патологическими переломами различных отделов скелета (позвонков, ребер и т.д.) и сопровождается выра-



женным болевым синдромом. Важное значение имеет наличие мягкотканых компонентов (плазмочитом). Выделяют три вида плазмочитом: внутрикостные, экстракостальные и экстрамедуллярные. Наличие экстракостальных и экстрамедуллярных плазмочитом может приводить к компрессии и инфильтрации прилежащих органов и тканей, в том числе спинного мозга, и являться одной из причин болевого синдрома.

В 2009 г. NCCN (National Comprehensive Cancer Network) впервые рекомендовано использование ПЭТ/КТ с 2-[^{18}F]фтор-2-дезоксиглюкозой (^{18}F -ФДГ) для диагностики ММ, однако диагностические возможности метода изучаются до настоящего времени [5]. Ряд исследований показал, что чувствительность и специфичность ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ в диагностике ММ достаточно высоки – составляют около 90% и от 70 до 100% соответственно [6, 7]. Авторы указывают на преимущества использования ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ по сравнению с другими методами диагностической визуализации. Наиболее важными являются: оценка метаболических процессов в очагах остеолитического, возможность обследования всего тела, в том числе с включением в исследование черепа и нижних конечностей, что позволяет наиболее точно оценить распространенность заболевания и выявить очаги экстрамедуллярного поражения. Кроме того, использование ПЭТ/КТ расширяет возможности обследования пациентов с почечной недостаточностью, у которых ограничено применение йодсодержащих рентгеноконтрастных препаратов. К определенным недостаткам метода следует отнести невысокую по сравнению с КТ и МРТ разрешающую способность ПЭТ-опции в клинически используемых ПЭТ/КТ-сканерах (5–6 мм), сложность оценки костей свода черепа на фоне интенсивного физиологического накопления ^{18}F -ФДГ в головном мозге. Сложности в оценке также возникают при выявлении диффузного поражения костного мозга, критерии диагностики которого в настоящее время не определены. Кроме того, наличие воспалительных процессов, характеризующихся повышенным накоплением ^{18}F -ФДГ, в том числе в зонах патологических переломов и установленных фиксирующих конструкций, также вызывает вопросы при трактовке результатов ПЭТ/КТ. Хорошо известен факт ложноотрицательных результатов ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ, обусловленных снижением активности фермента гексокиназы, которое встречается примерно у 20% больных ММ. Сочетание нескольких из указанных ограничений у одного больного может существенно влиять на точность диагностики ММ и должно учитываться при использовании ПЭТ/КТ.

Цель исследования: изучение возможностей ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ на этапе диагностики множественной миеломы.

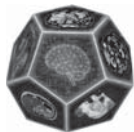
Материал и методы

В исследование включено 40 больных ММ до начала специфического лечения, которым в ПЭТ-центре отдела ядерной диагностики ФГБУ «НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева» Минздрава России с 2017 по 2024 г. выполнено 40 ПЭТ/КТ-исследований ($n = 40$). В анализируемую группу вошло 27 женщин и 13 мужчин в возрасте от 36 до 84 лет, средний возраст составил $65,5 \pm 9,4$ года. Диагноз ММ устанавливался на основании критериев, разработанных IMWG в 2014 г., и Российских клинических рекомендаций 2024 г. Стадия заболевания определялась соответственно международной системе стадирования International Staging System (R-ISS) и/или классификации B. Durie и S. Salmon; у 3 пациентов на момент проведения ПЭТ/КТ стадия заболевания не была установлена (табл. 1).

Таблица 1. Основные характеристики группы больных ММ ($n = 40$)

Table 1. Main characteristics of the group of patients with multiple myeloma ($n = 40$)

Показатель	Пациенты Patients, n (%)
Количество исследований Number of studies, n (%)	40 (100%)
Средний возраст, годы Middle age, years	65.5 ± 9.4
Мужчины / Male, n (%) Женщины / Female, n (%)	13 (37%) 22 (63%)
Стадия по ISS / Stage ISS: I, n (%) II, n (%) III, n (%)	17 (42%) 7 (18%) 2 (5%)
Стадия по B. Durie, S. Salmon Stage Durie-Salmon: IA, n (%) IIA, n (%) IIB, n (%) IIIA, n (%) Неизвестна / unknown	1 (2%) 6 (15%) 1 (2%) 3 (8%) 3 (8%)
Тип секреции моноклонального Ig Type of secretion of monoclonal Ig A λ , n (%) A κ , n (%) B λ , n (%) B κ , n (%) G λ , n (%) G κ , n (%) λ -СЛЦ, n (%) κ -СЛЦ, n (%) Несекретирующая / non-secreting Неизвестна / unknown	5 (13%) 2 (5%) 1 (2%) 4 (10%) 5 (13%) 18 (43%) 1 (2%) 1 (2%) 1 (2%) 3 (8%)



Всем пациентам ПЭТ/КТ проводилась по стандартному для онкологических больных протоколу. Подготовка к исследованию включала 12 ч безуглеводной диеты и не менее 6 ч голодания. В исследование включено 7 пациентов, страдающих сахарным диабетом, 3 из первой группы и 4 из второй. Этим больным исследование назначалось на утренние часы после не менее чем четырехчасового голодания до приема сахаропонижающих препаратов. Непосредственно в отделении подготовка пациента включала релаксацию с минимальной двигательной активностью примерно за час до введения ^{18}F -ФДГ и пероральную гидратацию – прием 1000–1200 мл воды либо 3% рентгеноконтрастного раствора омнипака. ^{18}F -ФДГ вводилась внутривенно из расчета 3–4 МБк/кг массы тела, средняя вводимая активность составила 175–350 МБк. Перед введением ^{18}F -ФДГ проводилось измерение уровня глюкозы в крови. Пациентам с гипергликемией выше 11 ммоль/л ПЭТ/КТ не выполнялась. Среднее значение уровня глюкозы в крови у больных, включенных в исследование, составило $5,0 \pm 0,7$ ммоль/л.

Сканирование начиналось через 90 мин после инъекции ^{18}F -ФДГ. Всем больным ($n = 35$) исследования проводились на гибридных ПЭТ/КТ-сканерах: Biograph-64 True Point или mCT фирмы Siemens (Германия), состоящих из 64-срезового спирального рентгеновского компьютерного томографа и высокоскоростного позитронно-эмиссионного томографа. ПЭТ/КТ выполнялась по стандартному протоколу в режиме обследования “все тело” (от макушки до средней трети бедра включительно) в положении лежа на спине. В 6 (15%) из 40 случаев по клиническим показаниям протокол исследования был расширен с включением верхних и/или нижних конечностей. КТ-сканирование проводилось при напряжении 120 кВ, силе тока 70–120 мА, с толщиной среза 5,0 мм и перекрытием срезов 2,0 мм; сбор ПЭТ-данных осуществлялся в течение 3 мин на каждое положение стола сканера. Реконструкция ПЭТ-данных выполнялась по итерационному алгоритму OSEM (2 итерации и 14 подмножеств), коррекция поглощения ПЭТ-данных осуществлялась по данным КТ. Реконструкция КТ-данных проводилась с толщиной среза 3 мм в мягкотканном (Kernel B30f medium smooth), легочном (Kernel B70f very sharp) и костном (Kernel B70f very sharp) окнах. Совмещение реконструированных ПЭТ- и КТ-изображений выполнялось автоматически.

Средняя лучевая нагрузка (эффективная доза), полученная пациентами при проведении ПЭТ/КТ, составила $16,8 \pm 8,4$ мЗв (от 10,9 до 29,1 мЗв).

Оценка ПЭТ/КТ-изображений осуществлялась с использованием двух методов: визуального и полуколичественного.

Визуальная оценка изображений проводилась по трем типам изображений – КТ, ПЭТ и совмещенному в трех проекциях (корональной, трансаксиальной и сагиттальной), а также по виртуальному трехмерному изображению.

При анализе КТ-изображений к патологическим изменениям, характерным для ММ, относились:

- единичные или множественные очаги деструкции костной ткани различной формы диаметром более 5 мм, в том числе с наличием патологических переломов;
- очаги деструкции костной ткани диаметром менее 5 мм (симптом “пробойника”) в виде групповых скоплений;
- вздутие костной ткани как с сохранением, так и разрушением кортикального слоя;
- плазмоцитомы как внутрикостные (расположенные в пределах кости без деструкции и с деструкцией кортикального слоя кости), так и экстракостальные (с разрушением кортикального слоя кости и распространением за пределы кости);
- экстрамедуллярные плазмоцитомы без признаков вовлечения рядом расположенных костей;
- признаки диффузного остеопороза в виде снижения плотности костной ткани и подчеркнутости коркового слоя костей в сочетании с каким-либо из вышеперечисленных признаков.

При анализе ПЭТ-изображений к патологическим изменениям, характерным для ММ, относились (рис. 1):

- очаги патологического накопления ^{18}F -ФДГ в участках остеолизиса, определяемым на КТ-изображениях, в том числе с внутрикостными и экстракостальными плазмоцитомами;
- очаги патологического накопления ^{18}F -ФДГ в мягкотканых структурах без вовлечения костной ткани – экстрамедуллярные плазмоцитомы;
- очаги патологического накопления ^{18}F -ФДГ в костном мозге без наличия соответствующих структурных изменений (костномозговой тип поражения);
- диффузное накопление ^{18}F -ФДГ в костном мозге, превышающее физиологическое накопление (SUL_{max}) в паренхиме правой доли печени, с наличием или без признаков остеопороза на компьютерной томограмме.

При анализе совмещенных ПЭТ/КТ-изображений выделено три типа поражений, характерных для ММ:

1) очаговый тип:

- а) структурные изменения на компьютерной томограмме, характерные для ММ (очаг остеолизиса более 5 мм, плазмоцитомы и т.д.), и соответствующий им очаг патологического накопления ^{18}F -ФДГ;

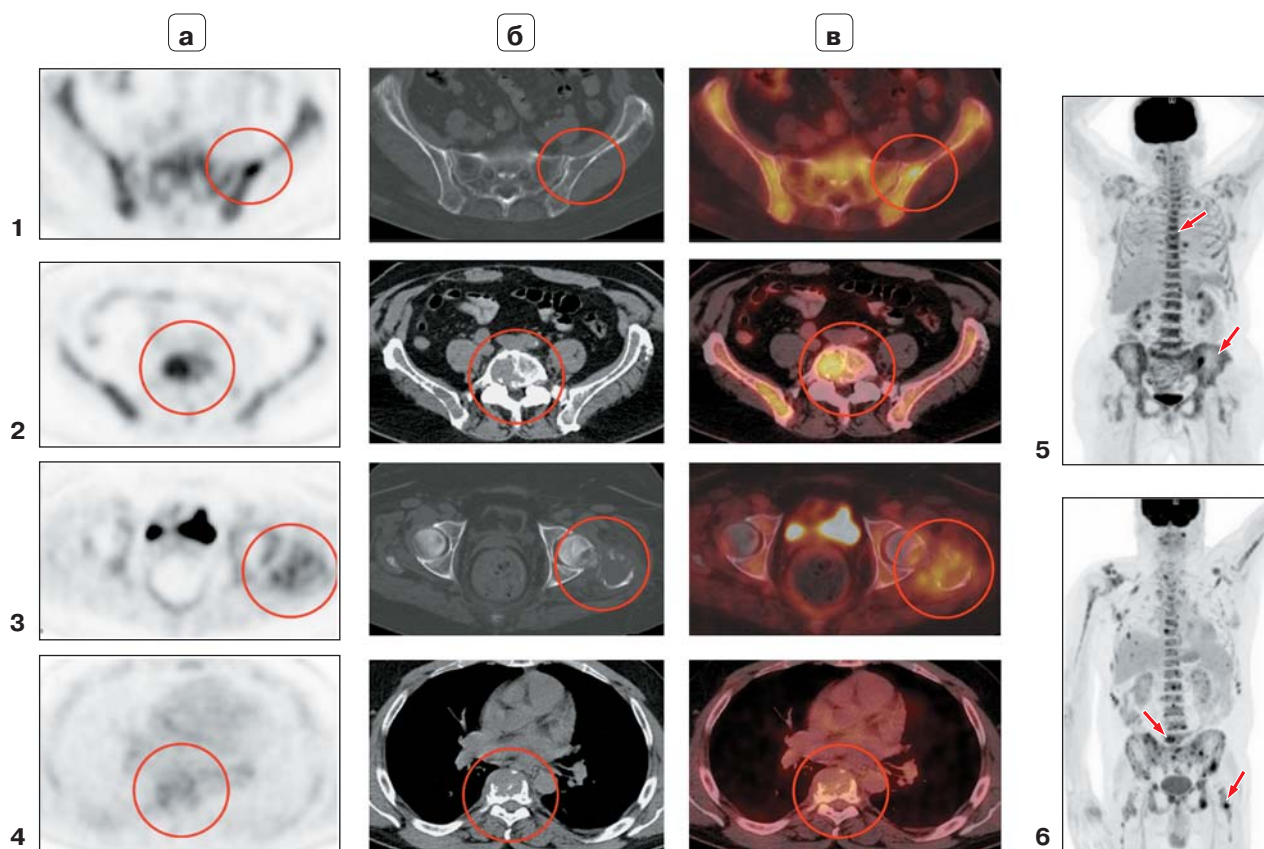
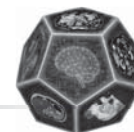


Рис. 1. Примеры основных патологических изменений у пациентов ММ (аксиальные проекции изображений. **а** – ПЭТ; **б** – КТ; **в** – фузионированного ПЭТ/КТ. 1 – очаг остеолизиса с патологическим накоплением ^{18}F -ФДГ; 2 – очаг остеолизиса с внутрикостной плазмцитомой и патологическим накоплением ^{18}F -ФДГ; 3 – очаг остеолизиса с костным вздутием, экстраоссальной плазмцитомой, патологическим переломом и патологическим накоплением ^{18}F -ФДГ; 4 – очаг остеолизиса с внутрикостной плазмцитомой без признаков патологического накопления ^{18}F -ФДГ; 5 – патологическое накопление ^{18}F -ФДГ диффузного типа (виртуальное трехмерное ПЭТ-изображение); 6 – патологическое накопление ^{18}F -ФДГ диффузно-очагового типа (виртуальное трехмерное ПЭТ-изображение).

Fig. 1. Examples of the main pathological changes in patients with MM (axial image projections. **a** – PET; **b** – CT; **v** – fusion PET/CT). 1 – osteolysis focus with pathological ^{18}F -FDG uptake; 2 – osteolysis focus with intraosseous plasmacytoma and pathological ^{18}F -FDG uptake; 3 – osteolysis focus with bone swelling, extraosseous plasmacytoma, pathological fracture and pathological ^{18}F -FDG uptake; 4 – osteolysis focus with intraosseous plasmacytoma without pathological ^{18}F -FDG uptake; 5 – pathological ^{18}F -FDG uptake of diffuse lesions (virtual PET image); 6 – pathological ^{18}F -FDG uptake of diffuse-focal lesions (virtual PET image).

б) структурные изменения на компьютерной томограмме, характерные для ММ, без наличия патологического накопления ^{18}F -ФДГ;

в) очаговое патологическое накопление ^{18}F -ФДГ без наличия соответствующих структурных изменений на компьютерной томограмме;

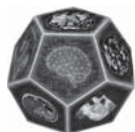
2) диффузный тип поражения – диффузное накопление ^{18}F -ФДГ в костном мозге, превышающее физиологическое накопление (SUL_{max}) в паренхиме правой доли печени, с наличием или без признаков остеопороза на компьютерной томограмме;

3) диффузно-очаговый тип – сочетание диффузного и очагового типов поражения.

Изменения, характерные для ММ, выявленные при КТ, ПЭТ, а также их сочетание по данным совмещенного ПЭТ/КТ-изображения анализировались по локализации, количеству и размерам.

Для оценки интенсивности очагового и диффузного патологического накопления ^{18}F -ФДГ использовался полуколичественный метод с расчетом показателя SUL_{max} . SUL – это значение SUV (максимальный стандартизованный уровень накопления ^{18}F -ФДГ в выбранной зоне интереса) с поправкой на мышечную (безжировую) массу тела (lean body mass – lbm).

Для статистического анализа использовалась программа Microsoft Excel версии 2406 (сборка



17726.20160). Проводилась оценка количественных данных на нормальность распределения, в случае нормального распределения данные представлялись в виде среднего арифметического со стандартным отклонением ($M \pm SD$). Параметрические данные оценивались при помощи t-критерия Стьюдента, а непараметрические – с помощью U-критерия Манна-Уитни. При оценке результатов анализа статистически достоверными считались различия при значениях $p < 0,05$.

Результаты исследования

Проанализировано 40 ПЭТ/КТ-изображений ($n = 40$) у 40 пациентов с ММ, по результатам которых выделено три типа поражения костей и костного мозга: 1) очаговый ($n = 29$); 2) диффузный ($n = 5$); 3) диффузно-очаговый ($n = 6$) (табл. 2).

У больных ММ в 29 (73%) из 40 ПЭТ/КТ-исследований определялся очаговый тип поражения костей и костного мозга.

В 16 (55%) из 29 случаев выявлены **очаги остеолизиса с соответствующим им патологическим накоплением** ^{18}F -ФДГ. Количество выявленных очагов существенно различалось: в 10 из 16 случаев определялось от 1 до 3 очагов; в 5 случаях – от 4 до 10 и в одном – более 10 очагов. В 8 (50%) из 16 случаев количество очагов остеолизиса, выявленных при КТ, соответствовало количеству очагов патологического гиперметаболизма, выявленных при ПЭТ. В остальных 8 (50%) случаях количество очагов остеолизиса, выявленных при КТ, превышало количество очагов патологического гиперметаболизма,

выявленных при ПЭТ. Наиболее часто, в 4 из 8 случаев, указанное несоответствие определялось при поражении костей черепа – патологические очаги при ПЭТ определялись только в наиболее крупных из очагов остеолизиса (диаметром более 15 мм) с наличием внутрикостных и экстракостальных плазмочитом.

В 2 из 16 случаев при ПЭТ наряду с очагами остеолизиса с патологическим накоплением ФДГ определялись очаги патологического гиперметаболизма без соответствующих им структурных изменений на компьютерной томограмме – костномозговой тип поражения.

В 13 (45%) из 29 случаев в костях **по результатам КТ определялись изменения, характерные для ММ без соответствующих им ПЭТ-признаков**. В 4 из 13 случаев выявлены признаки диффузного остеопороза, в одном случае в сочетании с мелкими очагами деструкции (диаметром менее 5 мм) в виде групповых скоплений. В остальных 9 из 13 случаев по результатам КТ определялись очаги остеолизиса диаметром более 5 мм: в трех случаях от 1 до 3 очагов; в двух – от 4 до 10; в 4 – более 10.

В 5 (13%) из 40 случаев в группе больных ММ определялся **диффузный тип поражения костей и костного мозга** (диффузное патологическое накопление ^{18}F -ФДГ в костном мозге с наличием или без признаков остеопороза на компьютерной томограмме): в 4 из 5 случаев по данным КТ определялись признаки остеопороза без наличия очагов деструкции, в одном – признаки остеопороза не определялись.

Таблица 2. Типы поражения костей и костного мозга при ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ у больных ММ ($n = 40$)

Table 2. Types of bone and bone marrow lesions in PET/CT with ^{18}F -FDG in patients with MM ($n = 40$)

	Типы поражения костей и костного мозга по результатам ПЭТ/КТ Types of bone and bone marrow lesions according to PET/CT results								
	очаговый тип / Focal type, n = 29					диффузный тип diffuse type n = 5	диффузно-очаговый тип diffuse-focal type n = 6		
	очаги остеолизиса с патологическим накоплением ¹⁸ F-ФДГ, количество очагов osteolytic foci with pathological 18F-FDG uptake, number of foci			КТ-признаки ММ без наличия ПЭТ-признаков CT signs of MM with no corresponding PET findings					
	1-3	4-10	более 10 over 10 foci	Остеопороз и очаги менее 5 мм*	Очаги более 5 мм d**		1-3	4-10	более 10 over 10 foci
Количество исследований Number of studies n = 40	10 (25%)	5 (13%)	1 (2%)	4 (10%)	9 (22%)	5 (13%)	1 (2%)	2 (5%)	3 (8%)

* Osteoporosis and small lesions (<5 mm); ** Lesions greater than 5 mm.

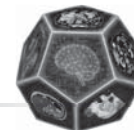


Таблица 3. Средние значения SUL_{max} при различных типах поражения костей и костного мозга в группе больных ММ (n = 40) по результатам ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ

Table 3. Mean SUL_{max} by bone/bone marrow lesion type in MM patients (n = 40) on ^{18}F -FDG PET/CT

	Типы поражения костей и костного мозга у больных ММ (n = 40) Types of bone and bone marrow lesions in MM patients (n = 40)		
	очаговый тип (1) focal type n = 29	диффузный тип (2) diffuse type n = 5	диффузно-очаговый тип (3) diffuse-focal type n = 6
Среднее значение Mean SUL_{max}	6.6 ± 5.3 $p_{1-2} = 0.01$	3.0 ± 0.4 $p_{2-3} = 0.03$	6.6 ± 3.1 $p_{1-3} = 0.44$

В 6 (15%) из 40 случаев в группе больных ММ выявлен **диффузно-очаговый тип поражения костей и костного мозга**: в одном случае определялось 3 очага патологического гиперметаболизма, в двух – от 4 до 10, в трех – более 10. В 2 (33%) из 6 случаев количество очагов деструкции, выявленных при КТ, соответствовало количеству очагов патологического гиперметаболизма, выявленных при ПЭТ. В остальных 4 (67%) случаях количество очагов остеолитических, выявленных при КТ, превышало количество очагов патологического гиперметаболизма, выявленных при ПЭТ.

Наиболее часто, в 30 (75%) из 40 случаев, патологические очаги на ПЭТ/КТ-изображении определялись в костях таза, ребрах и позвоночнике. Поражение длинных трубчатых костей (плечевых и бедренных) определялось в 12 (30%) из 40 случаев, поражение костей черепа – в 8 (20%) из 40.

При полуколичественной оценке ПЭТ/КТ-изображений в группе больных ММ наиболее интенсивное патологическое накопление ^{18}F -ФДГ определялось при очаговом и диффузно-очаговом типах поражения – SUL_{max} составил 6,6 ± 5,3 и 6,6 ± 3,1 соответственно. Статистически значимых различий SUL_{max} при очаговом и диффузно-очаговом типах поражения выявлено не было, $p = 0,44$ (табл. 3). При анализе группы в целом в сопоставимых по размерам очагах остеолитических выявлены существенные различия интенсивности патологического накопления ^{18}F -ФДГ (от низкого до высокого уровня): значения SUL_{max} находились в диапазоне от 1,6 до 22,2.

Аналогичные существенные различия интенсивности патологического накопления ^{18}F -ФДГ в сопоставимых по размерам очагах остеолитических определялись при анализе очагов у каждого отдельного больного (рис. 2).

В 18 (45%) из 40 случаев при ПЭТ/КТ были диагностированы плазмоцитомы: при диффузно-очаговом типе поражения в 83%, при очаговом типе поражения в 45%. В 14 (78%) из 18 случаев выявлены внутрикостные плазмоцитомы без деструкции и с деструкцией кортикального слоя кости; в 4 (22%)

из 18 случаев определялось экстраоссальное распространение плазмоцитом, в том числе с вовлечением прилежащих структур. В 2 (11%) из 18 случаев выявлено сочетание внутрикостных и экстрамедуллярных плазмоцитом. При анализе группы в целом в сопоставимых по размерам плазмоцитомах определялись существенные различия интенсивности патологического накопления ^{18}F -ФДГ (от низкого до высокого уровня): значения SUL_{max} находились в диапазоне от 1,3 до 12,5. В 3 случаях различия в интенсивности патологического накопления ^{18}F -ФДГ в сопоставимых по размерам плазмоцитомах определялись у каждого отдельного больного (рис. 3).

В 16 (40%) из 40 случаев у больных ММ определялись переломы костей различной локализации, компрессионные переломы позвонков или их сочетание. В 13 из 16 случаев выявлено локально повышенное накопление ^{18}F -ФДГ в зонах переломов ребер, в 3 случаях – в зонах компрессионных переломов позвонков.

Обсуждение

Согласно Российским и международным клиническим рекомендациям, одним из критериев для постановки диагноза симптоматической ММ является выявление одного или более очагов остеолитического размером больше 5 мм в диаметре. Оценка размеров, количества и локализация очагов остеолитического в костях при ММ имеет важное клиническое значение. Наличие распространенного остеодеструктивного процесса (более 10 очагов остеолитического) является прогностически неблагоприятным фактором, влияющим на общую выживаемость больных [8].

Для выявления остеодеструктивных процессов используются методы лучевой диагностики – рентгенография скелета, КТ, МРТ и ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ [3, 9–11]. ПЭТ/КТ – современная гибридная технология, позволяющая одновременно оценить структурные и метаболические изменения, давно вошла в рутинную клиническую практику и широко применяется в онкологии, гематологии, кардиологии и неврологии [12, 13]. Использование ПЭТ/КТ у больных ММ

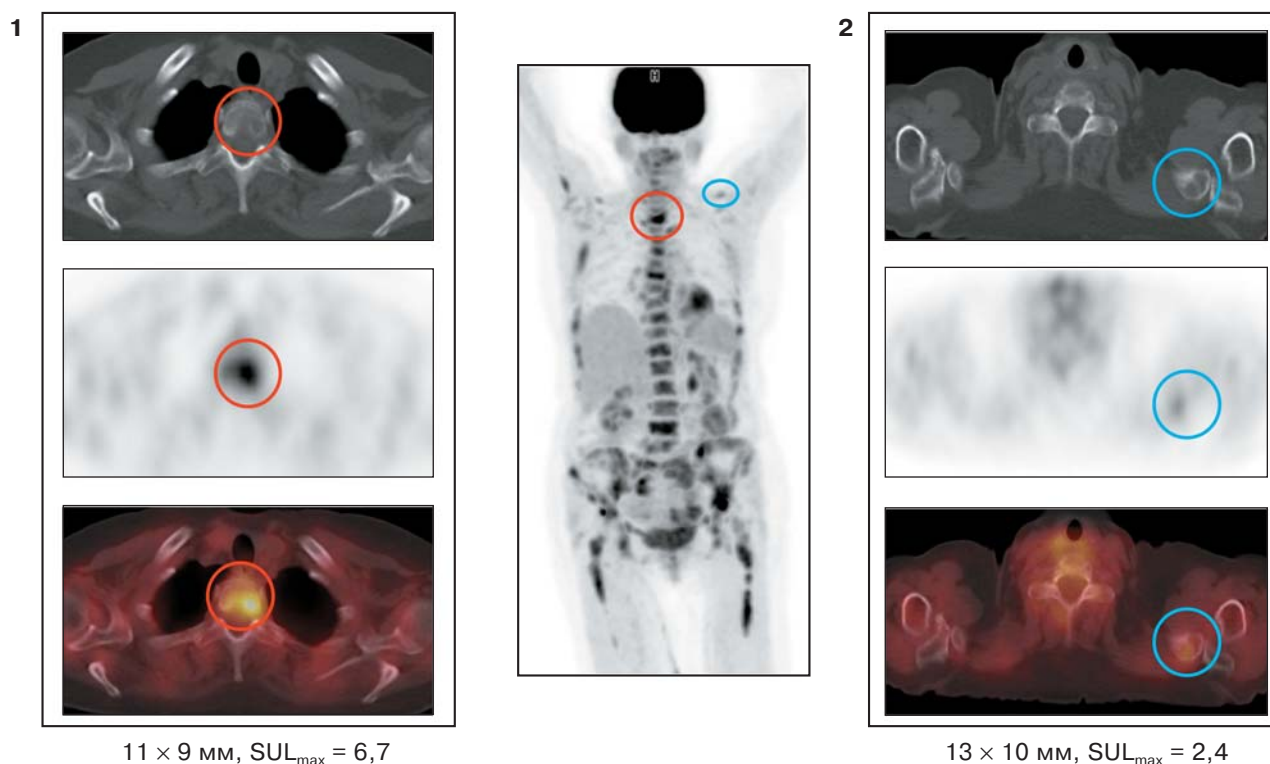
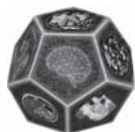


Рис. 2. Оценка интенсивности патологического накопления ^{18}F -ФДГ в сопоставимых по размерам очагах остеолитизиса. Больная Щ., 70 лет, с впервые выявленной ММ, протекающей с парапротеинемией $\text{A}\lambda$, II ст. по ISS, и распространенным остеодеструктивным процессом. 1 – очаг остеолитизиса в теле Th_{III} -позвонка размером 11×9 мм, $\text{SUL}_{\text{max}} = 6,7$ (красные круги); 2 – очаг остеолитизиса в акромиальном конце левой ключицы размером 13×10 мм, $\text{SUL}_{\text{max}} = 2,4$ (голубые круги).

Примечание. В центре – виртуальное трехмерное ПЭТ-изображение; справа и слева аксиальные проекции изображений, сверху вниз – КТ, ПЭТ, фузионированное ПЭТ/КТ.

Fig. 2. Assessment of the intensity of pathological ^{18}F -FDG uptake in osteolytic lesions of comparable size. Patient Sh., 70 years old, with newly diagnosed multiple myeloma presenting with $\text{A}\lambda$ paraproteinemia, stage II according to ISS, and extensive osteodestructive disease. 1 – osteolytic lesion in the body of the Th_3 vertebra, 11×9 mm, $\text{SUL}_{\text{max}} = 6.7$ (red circles); 2 – osteolytic lesion in the acromial end of the left clavicle, 13×10 mm, $\text{SUL}_{\text{max}} = 2.4$ (blue circles).

Note. In the center – virtual PET image; on the right and left – axial image projections, from top to bottom – CT, PET, fused PET/CT.

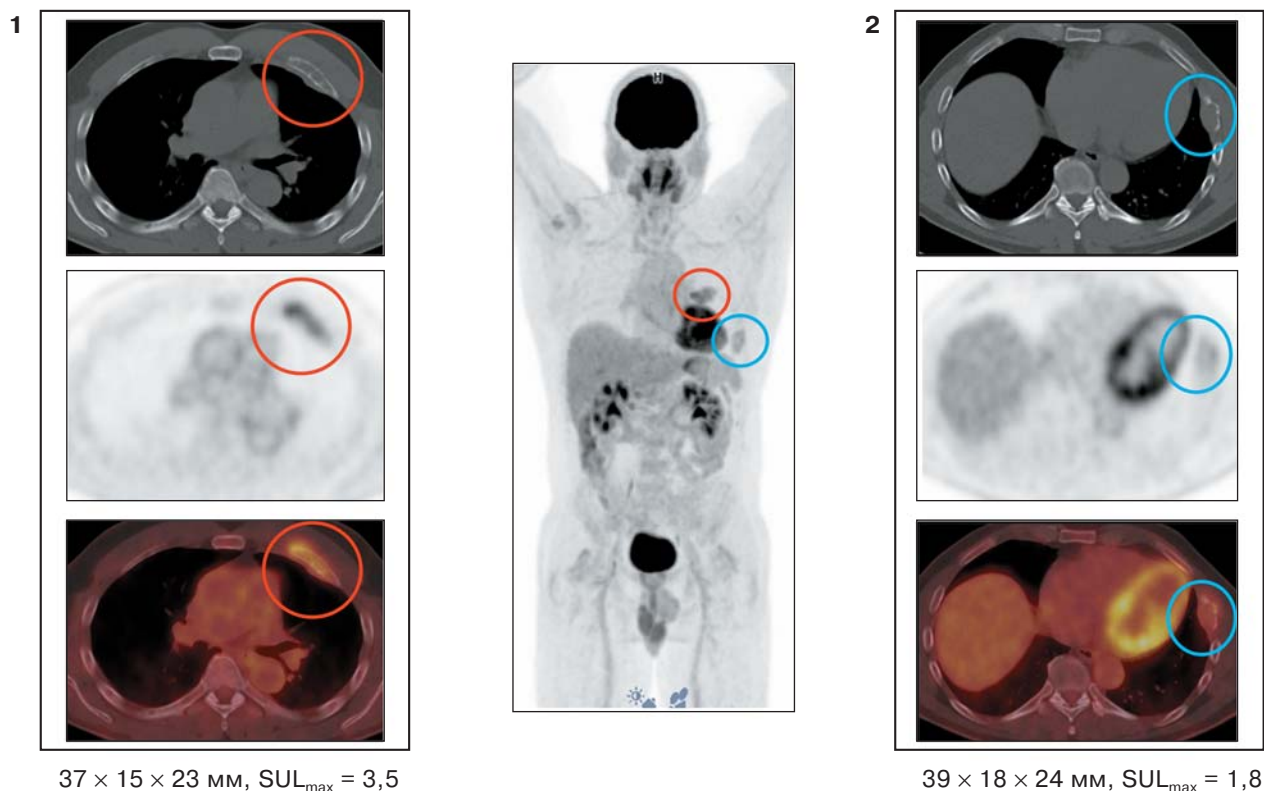
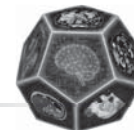
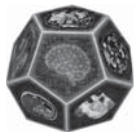


Рис. 3. Оценка интенсивности патологического накопления ^{18}F -ФДГ в сопоставимых по размерам экстраоссеальных плазмоцитомах. Больной Б., 54 лет, с впервые выявленной ММ, протекающей с парапротеинемией Gk, IIB ст. по D-S. 1 – плазмоцитома в передне-боковом отрезке III ребра слева размером 37 × 15 × 23 мм, $SUL_{max} = 3,5$ (красные круги); 2 – плазмоцитома в боковом отрезке VI ребра слева с распространением в грудную полость размером 39 × 18 × 24 мм, $SUL_{max} = 1,8$ (голубые круги).

Примечание. В центре – виртуальное трехмерное ПЭТ-изображение; справа и слева аксиальные проекции изображений, сверху вниз – КТ, ПЭТ, фузионированное ПЭТ/КТ.

Fig. 3. Assessment of pathological ^{18}F -FDG uptake intensity in extraosseous plasmacytomas of comparable size. Patient B., 54 years old, with newly diagnosed MM, presenting with Gk paraproteinemia, stage IIB according to D-S: 1 – plasmacytoma of the 3rd rib on the left, 37 × 15 × 23 mm, $SUL_{max} = 3.5$ (red circles); 2 – plasmacytoma of the 6th rib on the left with extension into the thoracic cavity, measuring 39 × 18 × 24 mm, $SUL_{max} = 1.8$ (blue circles).

Note. In the center – virtual PET image; on the right and left – axial projections of the images, from top to bottom – CT, PET, fused PET/CT.



имеет определенные преимущества по сравнению с другими методами лучевой диагностики.

Исследование выполняется по протоколу обследования “всего тела” – от макушки до средней трети бедра, что у большинства больных ММ позволяет оценить распространенность опухолевого процесса. По данным ряда исследований поражение верхних и нижних конечностей, не входящих в стандартный объем сканирования, встречается преимущественно при распространенном остеодеструктивном процессе – частота поражения конечностей у этих больных достигает 42%. Случаи изолированного поражения дистальных отделов конечностей немногочисленны [14, 15]. Расширение стандартного протокола ПЭТ/КТ с включением в исследование верхних и нижних конечностей у отдельных пациентов позволяет выявить дополнительные очаги заболевания, однако приводит к увеличению лучевой нагрузки, тогда как выявление единичных дополнительных очагов в большинстве случаев не имеет клинического значения. Ряд исследователей рекомендуют расширение стандартного протокола до уровня колен или верхних третей голени [15, 16]. В данной работе протокол ПЭТ/КТ был расширен у 8 из 40 у больных с распространенным остеодеструктивным процессом и у 6 больных с жалобами на боли в нижних и верхних конечностях. Во всех случаях вовлечения в процесс дистальных отделов скелета выявлено не было.

В настоящем исследовании частота поражения различных отделов скелета была сопоставима с данными литературы: в 65% случаев очаги остеолизиса определялись в костях таза, ребрах и позвоночнике, в 26% случаев – в проксимальных отделах плечевых и бедренных костей, в 17% случаев – в костях черепа. Необходимо отметить, что локализация патологических очагов в отдельных случаях влияет на точность их выявления, например, при расположении очагов в костях свода черепа. В проведенном исследовании среди пациентов с поражением костей свода черепа только в 50% случаев в очагах остеолизиса достоверно определялось патологическое накопление ^{18}F -ФДГ. Другие исследователи также указывают на сложности выявления очагов, расположенных в костях свода черепа, что связано с интенсивным физиологическим накоплением ^{18}F -ФДГ в головном мозге, затрудняющем оценку костей свода черепа, особенно мелких очагов деструкции [17].

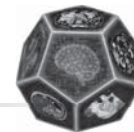
Несмотря на длительное применение ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ у больных ММ критерии оценки результатов исследования остаются не стандартизированными [11, 18, 19]. М. Ishibashi и соавт. предлагают оценивать ПЭТ/КТ визуально и полуколичественно

с расчетом различных показателей – SUV max, mean, peak [20]. Другие исследователи указывают на высокую погрешность полуколичественных показателей при выполнении исследований на различных сканерах и предлагают оценивать результаты ПЭТ/КТ только визуально, в том числе с использованием шкалы Deauville, хорошо зарекомендовавшей себя при лимфопролиферативных заболеваниях [19].

В настоящем исследовании интенсивность патологического накопления ^{18}F -ФДГ оценивалась двумя способами – визуальным по трем типам изображений (КТ, ПЭТ, совмещенному ПЭТ/КТ) и полуколичественным. Для полуколичественной оценки рассчитывался показатель SUL. Показатель SUL позволяет учитывать изменение массы тела пациента в процессе лечения, которое влияет на результаты полуколичественной оценки ПЭТ/КТ при выполнении повторных исследований. Данный показатель в настоящее время считается наиболее точным по сравнению с показателем SUV [21], и высокая информативность этого показателя в нашем исследовании подтверждает, что он заслуживает более широкого рутинного применения как в клинике, так и в исследовательских работах. Следует заметить, что для получения точных и воспроизводимых результатов ПЭТ/КТ большое значение имеют и другие факторы – правильная подготовка к исследованию, точное выполнение методики с соблюдением временных интервалов, использование одинаковых алгоритмов реконструкции изображения и т.д. В настоящем исследовании всем пациентам обследования выполнялись с использованием стандартных режимов подготовки, по стандартным протоколам ПЭТ/КТ. Оценка ПЭТ/КТ-изображений также осуществлялась однотипно по указанным в “Материалах и методах” критериям.

Проанализированы основные патологические процессы, выявляемые при ПЭТ/КТ по отдельным опциям – КТ, ПЭТ, а также по совмещенному ПЭТ/КТ-изображению. Полученные данные по совмещенному ПЭТ/КТ-изображению позволили выделить три типа изменений, характерных для ММ, – очаговый, диффузный и диффузно-очаговый. Мы полагаем, что проведенная систематизация позволит унифицировать описание результатов ПЭТ/КТ и повысит эффективность их использования в клинической практике.

Для выявления диффузного типа поражения по результатам ПЭТ/КТ в литературе в качестве референтной области наиболее часто используется накопление ^{18}F -ФДГ в паренхиме правой доли печени [18, 22]. В настоящем исследовании при использовании указанного критерия диффузный тип поражения выявлен в 23% случаев – патологические изме-



нения определялись только на ПЭТ-опции исследования, КТ-опция у всех пациентов была негативной.

При очаговом и диффузно-очаговом типах поражения патологические изменения очагового характера определялись на обеих опциях исследования (ПЭТ и КТ). Анализ очагов остеолизиса по КТ-опции показал идентичность их характеристик – различий по количеству, размерам, локализации, а также по наличию и количеству плазмоцитом не определялось. При анализе ПЭТ-опции исследования основные различия были выявлены в интенсивности накопления ^{18}F -ФДГ в патологических очагах – значения SUL_{max} находились в диапазоне от 1,6 до 22,2, в том числе в очагах остеолизиса, сопоставимых по размерам. Указанные различия в накоплении ^{18}F -ФДГ определялись как в целом в подгруппах больных с очаговым и диффузно-очаговым типами поражения, так и при анализе отдельных пациентов. Аналогичные результаты получены в других исследованиях [23, 24]. Называются две основные причины значительного разброса значений SUL_{max} в патологических очагах – наличие парциального объемного эффекта при оценке очагов малых размеров, а также биологическая и клиническая гетерогенность ММ. Наличие парциального объемного эффекта приводит к занижению интенсивности накопления ^{18}F -ФДГ в очагах малых размеров и уменьшению значения SUL_{max} , что затрудняет их выявление при оценке ПЭТ-опции исследования. Вопрос гетерогенности ММ активно обсуждается в современной научной литературе – авторы отмечают, что молекулярные характеристики опухолевого клона при ММ разнообразны, в ряде случаев встречается клональная гетерогенность в нескольких клонах, сосуществующих у одного больного, каждый из которых может характеризоваться разной интенсивностью накопления ^{18}F -ФДГ [23, 24].

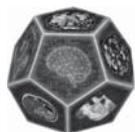
Сопоставление КТ- и ПЭТ-опций исследования показало, что в 62% случаев количество очагов, определяемых при КТ, превышало количество очагов, определяемых при ПЭТ. Результаты других исследований также указывают на данное несоответствие, которое, вероятнее всего, связано с различной разрешающей способностью ПЭТ и КТ – 5–6 мм и 1–2 мм соответственно, что является еще одной причиной недооценки мелких очагов остеолизиса по опции ПЭТ [7].

С другой стороны, исследователи указывают на наличие патологических очагов накопления ^{18}F -ФДГ без соответствующих им структурных изменений на компьютерной томограмме – костномозговой тип поражения [22]. В действующих клинических рекомендациях данный тип изменений не учитывается в качестве критерия ММ. Однако резорбция указанных очагов в процессе лечения ММ, по

нашему мнению, подтверждает их специфический генез. Данные В. Siontis и соавт. также подтверждают значение очагов костномозгового поражения, выявленных при ПЭТ/КТ с ФДГ: проанализированы отдаленные результаты 122 пациентов с тлеющей миеломой, в течение 2 лет диагноз симптоматической ММ установлен у 30% пациентов с ПЭТ-негативными результатами и у 75% ПЭТ-позитивных больных – с наличием очагов костномозгового поражения. Авторы сделали вывод, что наличие ^{18}F -ФДГ-позитивных очагов у пациентов с тлеющей ММ ассоциируется с быстрой прогрессией в симптоматическую ММ, что позволяет идентифицировать пациентов высокого риска, нуждающихся в лечении [25]. В настоящем исследовании очаги костномозгового типа определялись в 5% случаев, причем преимущественно у больных с распространенным остеодеструктивным процессом.

По данным различных авторов, ложноотрицательные результаты ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ на этапе диагностики заболевания определяются у 10–20% больных ММ [19, 26]. Причиной этого феномена является определяемый у части больных генетически низкий уровень экспрессии фермента гексокиназы-2, в результате чего происходит блокирование одного из основных механизмов накопления ^{18}F -ФДГ в опухолевой клетке. В настоящей работе в 33% случаев ММ выявлены ^{18}F -ФДГ-негативные результаты ПЭТ/КТ – на КТ-опции определялись диагностически значимые очаги остеолизиса, в том числе крупные, более 15 мм в диаметре, без признаков патологического гиперметаболизма или с низкой метаболической активностью, не превышающей фоновое накопление в неизмененных отделах скелета. Выявление на этапе диагностики ^{18}F -ФДГ-негативных больных ММ имеет важное клиническое значение, так как исключает возможность использования метода для последующей оценки эффективности лечения.

Одним из факторов неблагоприятного прогноза, влияющих на общую и безрецидивную выживаемость больных ММ, является наличие плазмоцитом – внутрикостных, экстраоссальных и экстрамедуллярных [27–29]. L. Rosiñol и соавт. показали, что частота выявления внутрикостных и экстраоссальных плазмоцитом у больных ММ находится в диапазоне от 7 до 34%, экстрамедуллярных плазмоцитом – от 1,8 до 4,5% [30]. В настоящей работе плазмоцитомы диагностированы в 45% случаев: наиболее часто определялись внутрикостные плазмоцитомы – в 78% случаев, экстраоссальные плазмоцитомы встречались реже – в 22% случаев, в 11% случаев внутрикостные плазмоцитомы сочетались с экстрамедуллярными. При диффузно-очаговом типе поражения плазмоцитомы выявлялись



в два раза чаще, чем при очаговом типе, – 83 и 45% случаев соответственно, причем плазмоцитомы встречались как у пациентов с единичными очагами остеолитизиса, так и с распространенным остеодеструктивным процессом. Интенсивность накопления ^{18}F -ФДГ в плазмоцитомах, в том числе сопоставимых по размеру, так же как и в очагах остеолитизиса, существенно различалась в подгруппе больных в целом и при анализе отдельных пациентов. Значения SUL_{max} в плазмоцитомах находились в диапазоне от 1,3 до 12,5, что, вероятно, как указывалось раньше, связано с биологической и клинической гетерогенностью ММ.

Переломы костей являются одним из осложнений ММ. Примерно у 40% пациентов они возникают в первый год болезни, у остальных 60% – в более поздние сроки [31]. Выделяют два основных патогенетических механизма развития переломов костей при ММ: первый связан с активностью остеокластов и формированием участков остеолитизиса (патологические переломы), второй – с наличием выраженного остеопороза (травматические переломы). По результатам V. Rodríguez-Laval и соавт., дифференциальная диагностика генеза переломов у больных ММ по результатам ПЭТ/КТ затруднена, так как уровни накопления ^{18}F -ФДГ в зонах патологических и травматических переломов существенно не различаются [22]. В настоящем исследовании переломы костей различной локализации определялись в 40% случаев. Вопрос дифференциальной диагностики генеза переломов в рамках настоящего исследования не анализировался, однако накопленный опыт обследования больных ММ показывает, что результаты повторных ПЭТ/КТ-исследований, выполненных в процессе лечения, у ряда больных позволяют дифференцировать генез переломов.

Таким образом, несмотря на то что ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ давно и эффективно используется в диагностике ММ, отдельные вопросы требуют дальнейшего изучения.

Заключение

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о полиморфизме изменений, выявляемых при ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ у больных ММ на этапе диагностики. Анализ изображений ПЭТ, КТ и совмещенной ПЭТ/КТ нашего исследования позволил выделить основные типы поражения: очаговый, диффузный и диффузно-очаговый. Использование предложенной классификации позволит стандартизировать описание результатов ПЭТ/КТ и повысить точность их оценки при выполнении повторных исследований в процессе лечения больных ММ.

Участие авторов

Манукова В.А. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, проведение исследования, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста.

Асланиди И.П. – участие в научном дизайне, концепция и дизайн исследования.

Мухортова О.В. – анализ и интерпретация полученных данных, написание текста, подготовка и редактирование текста, подготовка, создание опубликованной работы.

Пурсанова Д.М. – обзор публикаций по теме статьи, подготовка и редактирование текста.

Шурупова И.В. – статистическая обработка данных, участие в научном дизайне.

Метелкина М.В. – анализ и интерпретация полученных данных, статистическая обработка данных.

Румянцев А.С. – обзор публикаций по теме статьи.

Соловьев М.В. – ответственность за целостность всех частей статьи, утверждение окончательного варианта статьи.

Менделеева Л.П. – ответственность за целостность всех частей статьи, утверждение окончательного варианта статьи.

Authors' participation

Manukova V.A. – concept and design of the study, collection and analysis of data, conducting research, analysis and interpretation of the obtained data, writing text.

Aslanidis I.P. – participation in scientific design, concept and design of the study.

Mukhortova O.V. – analysis and interpretation of the obtained data, writing text, text preparation and editing, preparation and creation of the published work.

Pursanova D.M. – review of publications, text preparation and editing.

Shurupova I.V. – statistical analysis, participation in scientific design.

Metelkina M.V. – analysis and interpretation of the obtained data, statistical analysis.

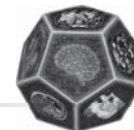
Rumyantsev A.S. – review of publications.

Solovov M.V. – responsibility for the integrity of all parts of the article, approval of the final version of the article.

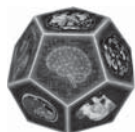
Mendeleva L.P. – responsibility for the integrity of all parts of the article, approval of the final version of the article.

Список литературы [References]

1. Менделеева Л.П., Вотякова О.М., Рехтина И.Г., Османов Е.А., Поддубная И.В., Гривцова Л.Ю., Фалалеева Н.А., Байков В.В., Ковригина А.М., Невольских А.А., Иванов С.А., Хайлова Ж.В., Геворкян Т.Г. Множественная миелома. *Современная онкология*. 2020; 22 (4): 6–28. <https://doi.org/10.26442/18151434.2020.4.200457>
Mendeleva L.P., Votikova O.M., Rehtina I.G. et al. Multiple myeloma. *Journal of Modern Oncology*. 2020; 22 (4): 6–28. <https://doi.org/10.26442/18151434.2020.4.200457> (In Russian)
2. Улумбекова Г.Э., Петрачков И.В. Онкогематологические заболевания в Российской Федерации и в развитых странах: смертность, заболеваемость, ресурсы и организация медицинской помощи с учетом пандемии COVID-19. ОРГЗДРАВ: новости,



- мнения, обучение. *Вестник ВШОУЗ*. 2022; 8 (2): 22–47. <https://doi.org/10.33029/2411-8621-2022-8-2-22-47>
- Ulumbekova G.E., Petrachkov I.V. Oncohematological diseases in the Russian Federation and in developed countries: mortality, incidence, resources and organization of medical assistance in consideration of the Covid-19 pandemic. *ORGZDRAV: novosti, mneniya, obuchenie. Vestnik VSHOUZ [HEALTHCARE MANAGEMENT: News, Views, Education. Bulletin of VSHOUZ]*. 2022; 8 (2): 22–47. <https://doi.org/10.33029/2411-8621-2022-8-2-22-47> (In Russian)
3. Клинические рекомендации по диагностике и лечению множественной миеломы/ разработанные Ассоциацией онкологов России, Национальным гематологическим обществом, Региональной общественной организацией “Общество онкогематологов”. М., 2024. ID: 144_2. Clinical Guidelines for the Diagnosis and Treatment of Multiple Myeloma / developed by the Association of Oncologists of Russia, the National Hematology Society, and the Regional Public Organization “Society of Oncohematologists”. Moscow, 2024. ID: 144_2 (In Russian)
4. Zamagni E., Tacchetti P., Cavo M. Imaging in multiple myeloma: How? When? *Blood*. 2019; 133 (7): 644–651. <https://doi.org/10.1182/blood-2018-08-825356>
5. Hameed A., Brady J.J., Dowling P. et al. Bone disease in multiple myeloma: pathophysiology and management. *Cancer Growth Metastasis*. 2014; 7: 33–42. <https://doi.org/10.4137/CGM.S16817>
6. Cavo M., Terpos E., Nanni C. et al. Role of ¹⁸F-FDG PET/CT in the diagnosis and management of multiple myeloma and other plasma cell disorders: a consensus statement by the International Myeloma Working Group. *Lancet Oncol*. 2017; 18 (4): e206–e217. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(17\)30189-4](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(17)30189-4)
7. Filippi L., Frantellizzi V., Bartoletti P. et al. Head-to-Head Comparison between FDG and ¹¹C-Methionine in Multiple Myeloma: A Systematic Review. *Diagnostics (Basel)*. 2023; 13 (12): 2009. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13122009>
8. Schinke C., Rasche L., Ashby C. et al. Prognostic impact of focal lesion location and persistence in multiple myeloma: insights from serial PET/DWI imaging. *Blood Advances*. 2025. <https://doi.org/10.1182/bloodadvances.2025016510>
9. Caers J., Garderet L., Kortüm K.M. et al. European Myeloma Network recommendations on tools for the diagnosis and monitoring of multiple myeloma: what to use and when. *Haematologica (Roma)*. 2018; 103 (11): 1772–1784. <https://doi.org/10.3324/haematol.2018.189159>
10. Rasche L., Angtuaco E., McDonald J.E. et al. Low expression of hexokinase-2 is associated with false-negative FDG-positron emission tomography in multiple myeloma. *Blood*. 2017; 130 (1): 30–34. <https://doi.org/10.1182/blood-2017-03-774422>
11. Nanni C., Deroose C.M., Balogova S. EANM guidelines on the use of [¹⁸F]FDG PET/CT in diagnosis, staging, prognostication, therapy assessment, and restaging of plasma cell disorders. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*. 2024; 52 (1): 171–192. <https://doi.org/10.1007/s00259-024-06858-9>
12. Голухова Е.З. Отчет о лечебной и научной работе Национального медицинского исследовательского центра сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева Минздрава России за 2024 год. Перспективы дальнейшего развития. Сердечно-сосудистые заболевания. *Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН*. 2025; 26 (спецвыпуск): 5–130. <https://doi.org/10.24022/1810-0694-2025-26S>
- Golukhova E.Z. Report on the clinical and scientific activity of Bakoulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery for 2024. Development prospects. *The Bulletin of Bakoulev Center. Cardiovascular Diseases*. 2025; 26 (Special Issue): 5–130. <https://doi.org/10.24022/1810-0694-2025-26S> (In Russian)
13. Бабенко С.И., Титов Д.А., Сачков А.С., Александрова С.А., Пурсанова Д.М., Храмченков А.Г. Репротезирование митрального и аортального клапанов сердца в сочетании с пластикой митрально-аортального контакта у пациентов с активным протезным эндокардитом. *Грудная и сердечно-сосудистая хирургия*. 2025; 67 (3): 289–297. <https://doi.org/10.24022/0236-2791-2025-67-3-289-297>
- Babenko S.I., Titov D.A. et al. Mitral and aortic valve reprototics in combination with mitral-aortic contact plastic surgery in patients with active prosthetic endocarditis. *Grudnaya i Serdechno-Sosudistaya Khirurgiya*. 2025; 67 (3): 289–297. <https://doi.org/10.24022/0236-2791-2025-67-3-289-297> (In Russian)
14. Данилина А.М., Менделеева Л.П., Костина И.Э., Грибанова Е.О., Рыжко В.В., Бальжанова Я.Б. Низкодозная компьютерная томография всего скелета у первичных пациентов со множественной миеломой. *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ». Реабилитация, Врач и Здоровье*. 2023; 13 (2): 62–69. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2023.2.CLIN.5>
- Danilina A.M., Mendeleeva L.P., Kostina I.E. et al. Whole-body low-dose computed tomography in primary patients with multiple myeloma. *Bulletin of the Medical Institute “REAVIZ”. Rehabilitation, Doctor and Health*. 2023; 13 (2): 62–69. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2023.2.CLIN.5>
15. Ippolito D., Giandola T., Maino C. et al. Whole-body low-dose computed tomography (WBLDCT) in staging and re-staging of multiple myeloma. *Ann. Hematol*. 2021; 100 (5): 1241–1249. <https://doi.org/10.1007/s00277-021-04468-1>
16. Gundesen M.T., Asmussen J.T., Haukås E. et al. A prospective study of Skeletal survey versus Low-dose whole-body CT for Osteolytic lesions in Multiple Myeloma. *Eur. J. Haematol*. 2022; 108 (5): 423–429. <https://doi.org/10.1111/ejh.13749>
17. Virk J., Hillengass J. Imaging in multiple myeloma. *Presse Med*. 2025; 54 (1): 104263. <https://doi.org/10.1016/j.lpm.2024.104263>
18. Li J., Tan H., Xu T. et al. Bone marrow tracer uptake pattern of PET-CT in multiple myeloma: image interpretation and prognostic value. *Ann. Hematol*. 2021; 100 (12): 2979–2988. <https://doi.org/10.1007/s00277-021-04629-2>
19. Nanni C., Versari A., Chauvie S. et al. Interpretation criteria for FDG PET/CT in multiple myeloma



- (IMPeTUs): final results. IMPe TUs (Italian myeloma criteria for PET USE). *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*. 2018; 45 (5): 712-719. <https://doi.org/10.1007/s00259-017-3909-8>
20. Ishibashi M., Takahashi M., Yamaya T., Imai Y. Current and Future PET Imaging for Multiple Myeloma. *Life (Basel)*. 2023; 13 (8): 1701. <https://doi.org/10.3390/life13081701>
21. Huang S., Fang M.S., Zhao M., Li F. Influence of fever on 18F-FDG PET/CT in vivo: Utilizing a quantitative parameter SUL. *Rev. Esp. Med. Nucl. Imagen. Mol. (Engl. Ed.)*. 2025; 44 (5): 500127. <https://doi.org/10.1016/j.remnie.2025.500127>
22. Rodríguez-Laval V., Lumbreras-Fernández B., Aguado-Bueno B., Gómez-León N. Imaging of Multiple Myeloma: Present and Future. *J. Clin. Med.* 2024; 13 (1): 264. <https://doi.org/10.3390/jcm13010264>
23. Hervé A.L., Florence M., Philippe M. et al. Molecular heterogeneity of multiple myeloma: pathogenesis, prognosis, and therapeutic implications. *J. Clin. Oncol.* 2011; 29 (14): 1893-1897. <https://doi.org/10.1200/JCO.2010.32.8435>
24. de Mel S., Lim S.H., Tung M.L., Chng W.J. Implications of heterogeneity in multiple myeloma. *Biomed. Res. Int.* 2014; 2014: 232546. <https://doi.org/10.1155/2014/232546>
25. Siontis B., Kumar S., Dispenzieri A. et al. Positron emission tomography-computed tomography in the diagnostic evaluation of smoldering multiple myeloma: identification of patients needing therapy. *Blood Cancer J.* 2015; 5 (10): e364. <https://doi.org/10.1038/bcj.2015.87>
26. Moreau P., Attal M., Caillot D. et al. Prospective evaluation of magnetic resonance imaging and [¹⁸F] Fluorodeoxyglucose positron emission tomography-computed tomography at diagnosis and before maintenance therapy in symptomatic patients with multiple myeloma included in the IFM/DFCI 2009 trial: results of the IMAJEM study. *J. Clin. Oncol.* 2017; 35 (25): 2911-2918. <https://doi.org/10.1200/JCO.2017.72.2975>
27. Pour L., Sevcikova S., Greslikova H. et al. Soft-tissue extramedullary multiple myeloma prognosis is significantly worse in comparison to bone-related extramedullary relapse. *Haematologica*. 2014; 99 (2): 360-364. <https://doi.org/10.3324/haematol.2013.094409>
28. Mangiacavalli S., Pompa A., Ferretti V. et al. The possible role of burden of therapy on the risk of myeloma extramedullary spread. *Ann. Hematol.* 2017; 96 (1): 73-80. <https://doi.org/10.1007/s00277-016-2847-z>
29. Beksac M., Seval G.C., Kanellias N. et al. A real world multicenter retrospective study on extramedullary disease from Balkan Myeloma Study Group and Barcelona University: analysis of parameters that improve outcome. *Haematologica*. 2020; 105 (1): 201-208. <https://doi.org/10.3324/haematol.2019.219295>
30. Rosiñol L., Beksac M., Zamagni E. et al. Expert review on soft-tissue plasmacytomas in multiple myeloma: definition, disease assessment and treatment considerations. *Br. J. Haematol.* 2021; 194 (3): 496-507. <https://doi.org/10.1111/bjh.17338>
31. Ormond Filho A.G., Carneiro B.C., Pastore D. et al. Whole-Body Imaging of Multiple Myeloma: Diagnostic Criteria. *RadioGraphics*. 2019; 39: 1077-1097. <https://doi.org/10.1148/rg.2019180096>

Для корреспонденции*: Манукова Вероника Алексеевна – e-mail: mmmvvvaa@mail.ru

Манукова Вероника Алексеевна – канд. мед. наук, врач-радиолог Центра ядерной диагностики ФГБУ "НМИЦ сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева" Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-9157-6077>

Асланиди Ираклий Павлович – доктор мед. наук, профессор, руководитель отдела ядерной диагностики, врач-радиолог Центра ядерной диагностики ФГБУ "НМИЦ сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева" Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-6386-2378>

Мухортова Ольга Валентиновна – доктор мед. наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела ядерной диагностики, врач-радиолог Центра ядерной диагностики ФГБУ "НМИЦ сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева" Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-7716-5896>

Пурсанова Диана Манолисовна – доктор мед. наук, старший научный сотрудник отдела ядерной диагностики, врач-радиолог Центра ядерной диагностики ФГБУ "НМИЦ сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева" Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-1846-0115>

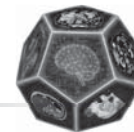
Шурупова Ирина Владимировна – доктор мед. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, врач-радиолог Центра ядерной диагностики ФГБУ "НМИЦ сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева" Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-2154-474X>

Метелкина Мария Васильевна – канд. мед. наук, младший научный сотрудник отдела ядерной диагностики, врач-рентгенолог Центра ядерной диагностики ФГБУ "НМИЦ сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева" Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-1831-0675>

Румянцев Александр Сергеевич – руководитель циклотронно-радиохимического блока, инженер-радиохимик Центра ядерной диагностики ФГБУ "НМИЦ сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева" Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0009-0000-7008-5781>

Соловьев Максим Валерьевич – канд. мед. наук, старший научный сотрудник, заведующий отделением гематологии и химиотерапии паранеопластических гемобластозов с блоком трансплантации костного мозга и гемопоэтических стволовых клеток ФГБУ "НМИЦ гематологии" Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-7944-6202>

Менделеева Лариса Павловна – доктор мед. наук, профессор, заведующая отделом химиотерапии паранеопластических гемобластозов ФГБУ "НМИЦ гематологии" Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-4966-8146>



Contact*: Veronika A. Manukova – e-mail: mmmvvvaa@mail.ru

Veronika A. Manukova – Cand. of Sci. (Med.), Radiologist at the Nuclear Diagnostics Center, A.N. Bakulev National Medical Research Center of Cardiovascular Surgery, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-9157-6077>

Irakli P. Aslanidis – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head of the Nuclear Diagnostics Department, Radiologist at the Nuclear Diagnostics Center, A.N. Bakulev National Medical Research Center of Cardiovascular Surgery, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-6386-2378>

Olga V. Mukhortova – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Leading Researcher of the Nuclear Diagnostics Department, Radiologist at the Nuclear Diagnostics Center, A.N. Bakulev National Medical Research Center of Cardiovascular Surgery, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-7716-5896>

Diana M. Pursanova – Doct. of Sci. (Med.), Senior Researcher, Department of Nuclear Diagnostics, Radiologist at the Nuclear Diagnostics Center, A.N. Bakulev National Medical Research Center of Cardiovascular Surgery, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-1846-0115>

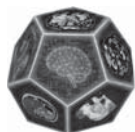
Irina V. Shurupova – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Leading Research Fellow, Radiologist at the Nuclear Diagnostics Center, A.N. Bakulev National Medical Research Center of Cardiovascular Surgery, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-2154-474X>

Maria V. Metelkina – Cand. of Sci. (Med.), Junior Researcher, Department of Nuclear Diagnostics, Radiologist at the Nuclear Diagnostics Center, A.N. Bakulev National Medical Research Center of Cardiovascular Surgery, Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-1831-0675>

Alexander S. Rumyantsev – Head of the Cyclotron Radiochemical Unit, Radiochemical Engineer at the Nuclear Diagnostics Center, A.N. Bakulev National Medical Research Center of Cardiovascular Surgery, Moscow. <https://orcid.org/0009-0000-7008-5781>

Maxim V. Solovev – Cand. of Sci. (Med.), Head of the Division of Chemotherapy of Paraproteinemic Hemoblastosis, National Medical Research Center for Hematology, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-7944-6202>

Larisa P. Mendeleeva – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Hematology and Chemotherapy of Paraproteinemic Hemoblastosis with Bone Marrow and Hematopoietic Stem Cell Transplantation Unit, National Medical Research Center for Hematology, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-4966-8146>



Дифференциальная диагностика липом и атипичных липоматозных опухолей (ALT) конечностей: мультицентровое исследование с использованием моделей машинного обучения на основе радиомических и семиотических признаков бесконтрастной МРТ

© Уразов А.В.^{1*}, Аксенова С.П.^{1, 2}, Нуднов Н.В.^{1, 2, 3}, Харченко Н.В.¹, Сергеев Н.И.²

¹ ФГАОУ ВО "Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы" Минобрнауки России; 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Российская Федерация

² ФГБУ "Российский научный центр рентгенорадиологии" Минздрава России; 117997 Москва, ул. Профсоюзная, д. 86, Российская Федерация

³ ФГБОУ ДПО "Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования" Минздрава России; 125993 Москва, ул. Баррикадная, д. 2/1, стр. 1, Российская Федерация

Дооперационная диагностика липом и атипичных липоматозных опухолей (ALT) конечностей остается актуальной клинической проблемой. При стандартной МРТ-оценке эти новообразования имеют сходные визуальные характеристики, что затрудняет постановку точного диагноза и может приводить к неправильной тактике лечения. В отличие от доброкачественных липом, ALT обладают потенциалом локального рецидивирования и требуют более радикального иссечения.

Современные подходы, основанные на радиомике и машинном обучении, позволяют извлекать из стандартных МР-последовательностей количественные признаки, отражающие микроструктурные особенности тканей, что открывает возможности для неинвазивной верификации диагноза.

Цель исследования: создать и провести сравнительный анализ диагностической эффективности моделей машинного обучения (LASSO и Random Forest), построенных на основе клинко-семиотических и радиомических признаков бесконтрастной МРТ (T1- и T2-ВИ), для дифференциальной диагностики липом и атипичных липоматозных опухолей (ALT) конечностей.

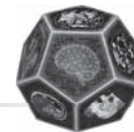
Материал и методы. Исследование является мультицентровым и ретроспективным. Включены данные 61 пациента с гистологически верифицированными липомами и атипичными липоматозными опухолями (ALT) конечностей. Проведена сегментация образований на бесконтрастных T1- и T2-ВИ с извлечением радиомических признаков ($n = 214$) и оценкой клинко-семиотических параметров ($n = 7$). Набор данных разделен на обучающую (80%) и тестовую (20%) выборки. Построены прогностические модели с использованием LASSO-логистической регрессии (кросс-валидация по 10 фолдам) и случайного леса (Random Forest, подбор гиперпараметров сеточным поиском). Эффективность моделей оценена по Accuracy, ROC-AUC, чувствительности, специфичности, Precision и F1-мере. Сравнение выполнено с применением теста Макнемара, теста Делонга и бутстрап-анализа (1000 итераций). Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$.

Результаты. На тестовой выборке LASSO-логистическая регрессия достигла ROC-AUC 0,889 (95% ДИ 0,694–1,000) и точности 0,692 (95% ДИ 0,434–0,950); чувствительность составила 0,250, специфичность – 0,889, F1-мера (F1-Score) – 0,333. Случайный лес показал ROC-AUC 0,833 (95% ДИ 0,533–1,000) при точности 0,692 (95% ДИ 0,440–0,944); чувствительность и F1-мера (F1-Score) составили 0,000 при специфичности 1,000.

При сравнении моделей с помощью теста Макнемара статистически значимых различий не выявлено ($p = 1,000$). Согласно тесту Делонга, различия в значениях ROC-AUC также не достигли статистической значимости ($p = 0,771$). Бутстрап-анализ (1000 итераций) подтвердил стабильность показателей: для LASSO средняя ROC-AUC составила $0,892 \pm 0,101$, точность – $0,691 \pm 0,131$, для случайного леса – $0,832 \pm 0,153$ и $0,685 \pm 0,125$ соответственно.

LASSO-регрессия отобрала 12 наиболее значимых признаков, включающих семиотические характеристики ("гиперинтенсивный сигнал с FS", "расположение относительно компартментов", "форма", "количество перегородок", "наличие солидной ткани", "толщина перегородок") и радиомические параметры (Coarseness, Maximum2DDiameterColumn, VoxelVolume, ShortRunLowGrayLevelEmphasis.1, MeshVolume, Maximum2DDiameterColumn.1).

Заключение. В данном исследовании LASSO-логистическая регрессия и случайный лес, построенные на основе клинко-семиотических и радиомических признаков бесконтрастной МРТ (T1- и T2-ВИ), продемонстрировали сопоставимую эффективность в дифференциальной диагностике липом и атипичных липоматозных опухолей конечностей (ROC-AUC 0,889 и 0,833 соответственно; $p > 0,05$).



Разработанные прогностические модели в перспективе могут служить инструментом поддержки принятия клинических решений, способствуя повышению точности дооперационной диагностики и стандартизации оценки липоматозных образований мягких тканей. Для подтверждения полученных результатов требуется дальнейшее тестирование на расширенных выборках с проведением внешней валидации.

Ключевые слова: дифференциальная диагностика; липома; атипичная липоматозная опухоль (ALT); магнитно-резонансная томография (МРТ); радиомика; машинное обучение; LASSO; случайный лес; мультицентровое исследование

Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Уразов А.В., Аксенова С.П., Нуднов Н.В., Харченко Н.В., Сергеев Н.И. Дифференциальная диагностика липом и атипичных липоматозных опухолей (ALT) конечностей: мультицентровое исследование с использованием моделей машинного обучения на основе радиомических и семиотических признаков бесконтрастной МРТ. *Медицинская визуализация*. 2026; 30 (3): 124-135. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1655>

Поступила в редакцию: 02.06.2026.

Принята к печати: 31.08.2026.

Опубликована online: 28.09.2026.

Differential diagnosis of lipomas and atypical lipomatous tumors (ALT) of the extremities: a multicenter study using machine learning models based on radiomic and semiotic features of non-contrast MRI

© Aleksandr V. Urazov^{1*}, Svetlana P. Aksenova^{1, 2}, Nikolay V. Nudnov^{1, 2, 3},
Natalia V. Kharchenko¹, Nikolay I. Sergeev²

¹ Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University); 6, Miklukho-Maklay str., Moscow 117198, Russian Federation

² Russian Scientific Center of Roentgenoradiology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 86, Profsoyusnaya str., Moscow 117997, Russian Federation

³ Russian Medical Academy of Continuous Professional Education of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 2/1-1, Barrikadnaya str., Moscow 125993, Russian Federation

Preoperative differentiation of lipomas from atypical lipomatous tumors (ALT) of the extremities remains a relevant clinical challenge. On standard MRI assessment, these neoplasms demonstrate overlapping imaging characteristics, which complicates accurate diagnosis and may lead to suboptimal treatment strategies. Unlike benign lipomas, ALTs carry a potential for local recurrence and require wider surgical excision.

Contemporary approaches based on radiomics and machine learning enable the extraction of quantitative features from standard MRI sequences that reflect the microstructural properties of tissues, thereby offering opportunities for non-invasive diagnostic verification.

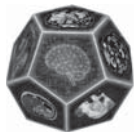
Objective. To develop and comparatively evaluate the diagnostic performance of machine learning models (LASSO logistic regression and Random Forest) built upon clinical-semiotic and radiomic features derived from non-contrast MRI (T1-WI and T2-WI) for the differential diagnosis of lipomas and atypical lipomatous tumors (ALT) of the extremities.

Materials and Methods. This multicenter, retrospective study included data from 61 patients with histologically verified lipomas and atypical lipomatous tumors (ALT) of the extremities. Tumor segmentation was performed on non-contrast T1-WI and T2-WI sequences, followed by extraction of radiomic features ($n = 214$) and assessment of clinical-semiotic parameters ($n = 7$). The dataset was split into training (80%) and test (20%) subsets. Predictive models were constructed using LASSO logistic regression (10-fold cross-validation) and Random Forest (hyperparameter tuning via grid search). Model performance was evaluated by Accuracy, ROC-AUC, sensitivity, specificity, Precision, and F1-score. Comparison was performed using McNemar's test, DeLong's test, and bootstrap analysis (1,000 iterations). Differences were considered statistically significant at $p < 0.05$.

Results. On the test subset, LASSO logistic regression achieved an ROC-AUC of 0.889 (95% CI 0.694-1.000) and an accuracy of 0.692 (95% CI 0.434-0.950); sensitivity was 0.250, specificity 0.889, and F1-score 0.333. The Random Forest model yielded an ROC-AUC of 0.833 (95% CI 0.533-1.000) with an accuracy of 0.692 (95% CI 0.440-0.944); sensitivity and F1-score were 0.000 at a specificity of 1.000.

McNemar's test revealed no statistically significant difference between the models ($p = 1.000$). DeLong's test likewise showed no significant difference in ROC-AUC values ($p = 0.771$). Bootstrap analysis (1,000 iterations) confirmed the stability of the metrics: for LASSO, the mean ROC-AUC was 0.892 ± 0.101 and accuracy 0.691 ± 0.131 ; for Random Forest, 0.832 ± 0.153 and 0.685 ± 0.125 , respectively.

LASSO regression selected 12 features of highest importance, comprising semiotic characteristics ("Hyperintense signal on FS", "intra-/extra compartmental location", "Shape", "Number of septa", "Presence of solid tissue", "Septal thickness") and radiomic parameters (Coarseness, Maximum2DDiameterColumn, VoxelVolume, ShortRunLowGrayLevelEmphasis.1, MeshVolume, Maximum2DDiameterColumn.1).



Conclusion. In this study, LASSO logistic regression and Random Forest models constructed from clinical-semiotic and radiomic features of non-contrast MRI (T1-WI and T2-WI) demonstrated comparable diagnostic performance in the differential diagnosis of lipomas and atypical lipomatous tumors of the extremities (ROC-AUC 0.889 and 0.833, respectively; $p > 0.05$).

The developed predictive models may prospectively serve as clinical decision-support tools, contributing to improved preoperative diagnostic accuracy and standardization of soft tissue lipomatous lesion assessment. Further validation on larger cohorts with external validation is required to confirm these findings.

Keywords: differential diagnosis; lipoma; atypical lipomatous tumor (ALT); magnetic resonance imaging (MRI); radiomics; machine learning; LASSO; random forest; multicenter study

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Urazov A.V., Akseanova S.P., Nudnov N.V., Kharchenko N.V., Sergeev N.I. Differential Diagnosis of Lipomas and Atypical Lipomatous Tumors (ALT) of the Extremities: A Multicenter Study Using Machine Learning Models Based on Radiomic and Semiotic Features of Non-Contrast MRI. *Medical Visualization*. 2026; 30 (3): 124-135. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1655>

Received: 02.06.2026.

Accepted for publication: 31.08.2026.

Published online: 28.09.2026.

Введение

Липосаркомы занимают второе место среди всех гистологических подтипов сарком мягких тканей, уступая лишь фибросаркомам. По данным программы SEER (США) за 2001–2021 гг. их доля достигает 20% [1]. Показатели пятилетней выживаемости при данном типе опухоли существенно различаются (от 57,2 до 93%) [2, 3], что связано с гетерогенностью биологического поведения различных гистологических вариантов. Заболеваемость липосаркомами оценивается в 2,5 случая на 1 млн населения, максимальная заболеваемость приходится на возраст 50–60 лет с преобладанием мужского пола [1, 3]. Наиболее типичная локализация – нижняя конечность (35,5%, преимущественно бедро и область коленного сустава), реже – туловище (28,7%) [1, 4].

В Российской Федерации эпидемиологические данные по липосаркомам представлены ограниченно. Согласно статистическому отчету “Злокачественные новообразования в России” за 2024 г., в 2023 г. зарегистрировано 3214 случаев сарком мягких тканей, из которых на долю липосарком приходится около 22% [5]. Заболеваемость саркомами мягких тканей в РФ составляет 1,7–2,2 случая на 100 000 населения [5–7]. Однако в открытых национальных сводках отсутствует детализация по разным гистологическим подтипам [5].

Среди доброкачественных липоматозных образований наиболее распространены липомы, составляющие до 50% всех опухолей мягких тканей [8, 9]. Характерными морфологическими признаками липом на МР-томограмме являются инкапсулированные образования, изоинтенсивные подкожному жиру во всех импульсных последовательностях, нередко с тонкими перегородками, которые в большинстве случаев не накапливают контрастный препарат (58%) [8, 9]. В отличие от них, при атипичных липоматозных опухолях (ALT) контрастное усиление

перегородок наблюдается значительно чаще (78%). При КТ плотность липом составляет от –120 до –65 HU [10].

ALT является наиболее частым подтипом среди липосарком (40–45% случаев). Наиболее типичные места возникновения – глубокие мягкие ткани конечностей и забрюшинное пространство, реже – грудная стенка, голова и шея [11, 12]. ALT характеризуется локально агрессивным ростом и склонностью к рецидивированию и крайне низким метастатическим потенциалом. Гистологически опухоль представлена зрелыми адипоцитами с очагами атипичных стромальных клеток и липобластов. Характерными молекулярными маркерами являются экспрессия генов MDM2 и CDK4, позволяющая дифференцировать ALT от доброкачественных липом [12, 13]. При использовании методов лучевой диагностики (МРТ, КТ) выявляются утолщенные перегородки и узловые элементы, что служит признаками злокачественности.

Дифференциальная диагностика липом и ALT остается сложной задачей, поэтому использование радиомического анализа и методов машинного обучения может открыть новые возможности для неинвазивной верификации диагноза, позволяя выявлять количественные признаки, недоступные при традиционной визуальной оценке МР-изображений [14]. Применение радиомики может уменьшить субъективность интерпретации изображений, что имеет важное значение для клинической практики.

Материал и методы

Исследование выполнено как ретроспективный наблюдательный анализ с формированием выборки из трех медицинских центров: ФГБУ “РНЦРР” Минздрава России; МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава России;

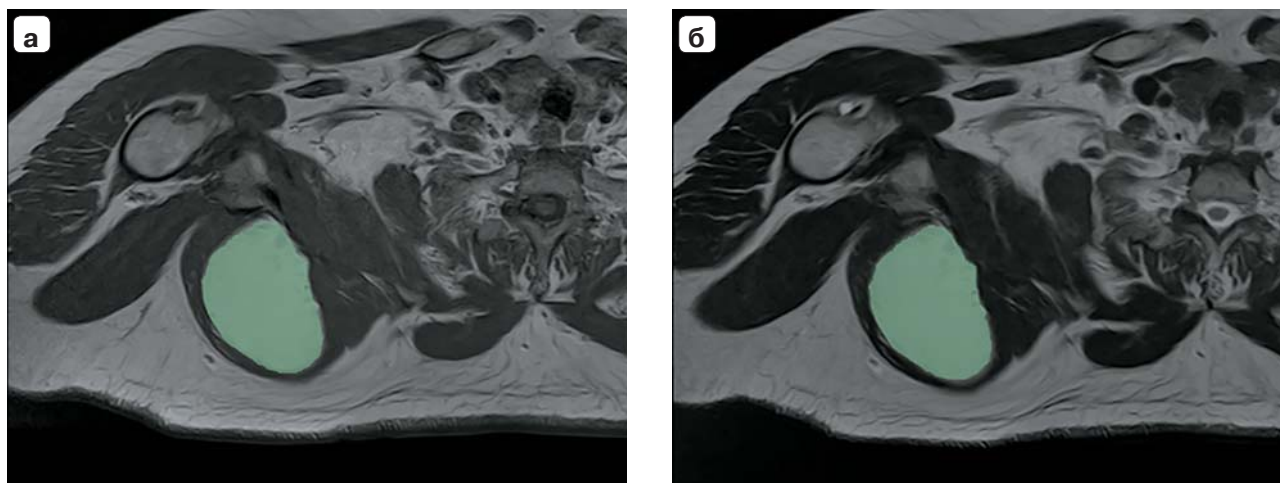
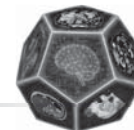


Рис. 1. Пример оконтуривания образования на T1-ВИ (а) и T2-ВИ (б).

Fig. 1. Example of lesion segmentation on T1-weighted (a) and T2-weighted (b) images.

МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава России. Все пациенты дали письменное информированное согласие на участие в исследовании.

За период с 2012 по 2025 г. были отобраны данные 950 пациентов с морфологически подтвержденными новообразованиями мягких тканей конечностей, среди которых на этапе скрининга отбирались пациенты с диагнозами липома (D17) и липосаркома (C49).

В исследование включались пациенты, соответствующие следующим условиям:

1. Гистологически верифицированный диагноз липомы (код МКБ-10: D17) или атипичных липоматозных опухолей (ALT) (код МКБ-10: C49), установленный по результатам морфологического исследования операционного или биопсийного материала.

2. Наличие МРТ-исследования, выполненного до начала лечения (хирургического вмешательства или иных видов противоопухолевой терапии).

Из исследования исключались пациенты, не соответствующие следующим условиям:

1. Выраженные артефакты на МР-изображениях.
2. Неполный протокол МРТ-исследования.
3. Гистологический подтип липосарком, отличный от атипичной липоматозной опухоли (ALT), либо неуточненный гистологический подтип.

Характеристика выборки. После применения критериев включения и исключения в исследование вошел 61 пациент: 46 (75,4%) с гистологически верифицированной липомой и 15 (24,6%) с атипичной липоматозной опухолью (ALT). Возраст пациентов варьировал от 27 до 89 лет, средний возраст – 57 лет. Для каждого пациента извлечены радиомические и семиотические признаки, всего 221.

Получение МР-изображений. МРТ выполнялась на системах с напряженностью магнитного поля 1,5 Тл производства Siemens (Aera, Amira, Symphony, Magnetom Vida), GE (Signa Excite, Signa Voyager), Toshiba (Titan) и Philips (Ingenia). Протокол исследования соответствовал рекомендациям Европейского общества радиологов (ESSR) 2024 г. [4].

Стандартный протокол включал следующие импульсные последовательности: T2-, T1-ВИ, а также последовательности с подавлением сигнала от жировой ткани (T1-ВИ FS, T2-ВИ FS, STIR или DIXON или T1-ВИ fat sat, T2-ВИ fat sat, STIR или DIXON). Выбор конкретного метода жироподавления определялся в зависимости от производителя томографа, наличия металлических конструкций в зоне сканирования и клинической ситуации с учетом заключения лечащего врача. Дополнительно проводились диффузионно-взвешенные изображения (ДВИ) с b-фактором 8000–1000 с/мм² и T1-ВИ fat sat после внутривенного введения контрастного препарата на основе солей гадолиния. В отдельных случаях для более детальной оценки взаимоотношений опухоли с сосудистыми структурами применялись косые плоскости сканирования. При наличии множественных образований для последующей сегментации выбиралась опухоль с наилучшей визуализацией в последовательностях T2- и T1-ВИ.

Сегментация опухоли на МР-изображениях. Сегментация областей интереса (ROI) производилась вручную одним исследователем на T1- и T2-последовательностях с использованием бесплатного программного обеспечения 3D-Slicer (рис. 1), позволяющего выделять области интереса и экспортировать радиомические показатели. Для каждого новообразования рассчитано по 107 радиоми-

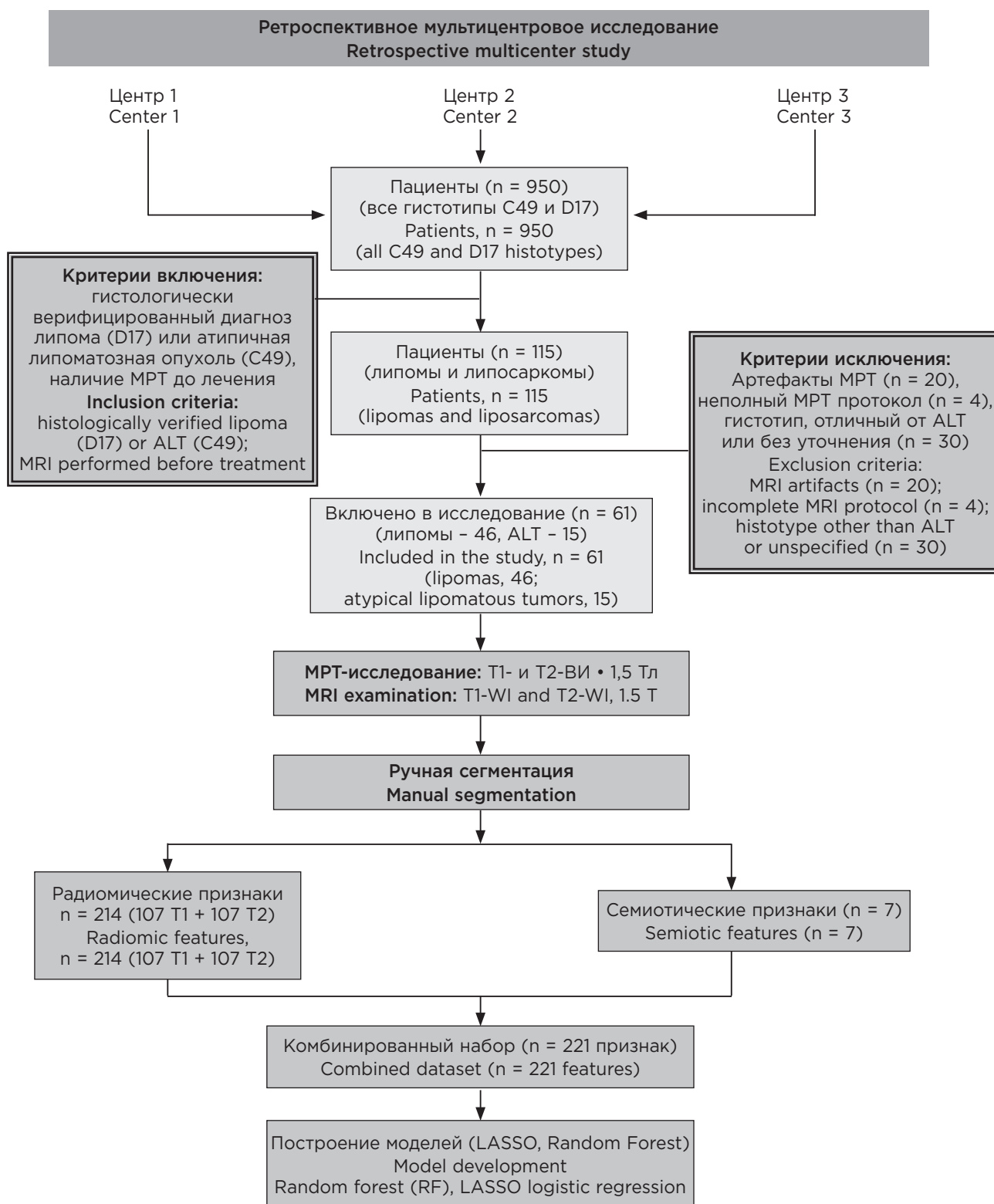
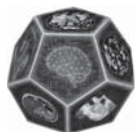
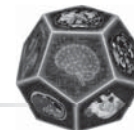


Рис. 2. Дизайн исследования.

Fig. 2. Study design.



ческих признаков отдельно для T1- и T2-последовательностей.

Формирование набора признаков. Для построения прогностических моделей использован комбинированный набор данных, включающий 107 радиомических признаков из T1-ВИ, 107 признаков из T2-ВИ и 7 семиотических параметров, таких как локализация опухоли, расположение относительно компартментов, форма, интенсивность МР-сигнала на T1-ВИ с подавлением сигнала от жировой ткани, количество перегородок, толщина перегородок, наличие солидной ткани, которые являются статистически значимыми для дифференциальной диагностики липом и липосарком [15]. Общее число признаков составило 221.

Машинное обучение и построение модели. Анализ выполнен на языке Python 3.12 с использованием библиотек pandas, numpy, matplotlib, seaborn, sklearn и scipy.stats. Набор данных был разделен на обучающую (80%) и тестовую (20%) выборки. Для LASSO-логистической регрессии признаки были стандартизированы с помощью StandardScaler. Оптимизация гиперпараметров и отбор признаков выполнялись методом GridSearchCV с 10-кратной кросс-валидацией по критерию ROC-AUC. Лучшая модель LASSO автоматически обнуляла коэффициенты для неинформативных признаков, обеспечивая отбор наиболее значимых из них.

Для случайного леса (Random Forest) подбор гиперпараметров также проводился с помощью GridSearchCV с 5-кратной кросс-валидацией. Оптимизации подлежали следующие параметры: количество деревьев (n_estimators: 50, 100, 200, 300), критерий разбиения (criterion: 'gini', 'entropy'), максимальная глубина деревьев (max_depth: 4-8) и стратегия выбора признаков (max_features: 'sqrt', 'log2'). Эффективность моделей оценивалась на тестовой выборке по показателям: точность (accuracy), ROC-AUC (площадь под ROC-кривой), чувствительность (sensitivity), специфичность (specificity), precision (прецизионность) и F1-score (F1-меры). Сравнение моделей проведено с использованием теста Макнемара, теста Делонга и бутстрап-анализа (1000 итераций). Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$. Дизайн исследования схематически представлен на рис. 2.

Результаты исследования

МР-семиотика липоматозных опухолей ретроспективно оценивалась по следующим параметрам: локализация, расположение относительно компартментов, форма, интенсивность сигнала на ИП с подавлением сигнала от жировой ткани, количество перегородок, толщина перегородок, наличие со-

лидной ткани. Пример МР-характеристики и визуализации липомы представлен на рис. 3, ALT – на рис. 4. Для ALT в сравнении с липомами более характерны ($p < 0,05$): глубокое расположение между компартментами (60,0% против 17,4%), неправильная или многоузловая форма (46,7% против 2,2%), наличие очагов с гиперинтенсивным сигналом на импульсной последовательности с подавлением жира (73,3% против 23,9%), большее число перегородок (более трех у 53,3% против 17,4%), утолщенные перегородки (66,7% против 23,9%), а также присутствие солидной ткани (46,7% против 8,7%). Выявленные различия в МР-семиотике между липомами и ALT легли в основу формирования комбинированного набора из 221 признака (7 семиотических и 214 радиомических), на котором были обучены прогностические модели.

Описание: локализация – левая нижняя конечность, расположение опухоли относительно кожи – глубокое; расположение опухоли относительно компартментов – внутри компартмента; форма – овоидная; объем в см^3 – $>100 \text{ см}^3$; интенсивность МР-сигнала опухоли на T2-ВИ – гиперинтенсивный; интенсивность МР-сигнала опухоли на T1-ВИ – гиперинтенсивный; интенсивность МР-сигнала опухоли на ИП с подавлением сигнала от жировой ткани – изоинтенсивный; количество перегородок – более 3; толщина перегородок – менее 2 мм; наличие солидной ткани – нет.

Описание: локализация – правая нижняя конечность, расположение опухоли относительно кожи – глубокое; расположение опухоли относительно компартментов – внутри компартмента; форма – овоидная; объем в см^3 – $>100 \text{ см}^3$; интенсивность МР-сигнала опухоли на T2-ВИ – гиперинтенсивный; интенсивность МР-сигнала опухоли на T1-ВИ – гиперинтенсивный; интенсивность МР-сигнала опухоли на ИП с подавлением сигнала от жировой ткани – гипоинтенсивный; количество перегородок – более 3; толщина перегородок – более 2 мм; наличие солидной ткани – нет.

Эффективность моделей. На тестовой выборке LASSO-логистическая регрессия достигла ROC-AUC 0,889 (95% ДИ 0,694-1,000), точности 0,692 (95% ДИ 0,434-0,950), чувствительности 0,250, специфичности 0,889, F1-меры (F1-score) 0,333.

Случайный лес показал ROC-AUC 0,833 (95% ДИ 0,533-1,000) при аналогичной точности 0,692 (95% ДИ 0,440-0,944); чувствительность и F1-мера были равны 0, специфичность – 1,000. Нулевая чувствительность модели случайного леса, вероятно, обусловлена несбалансированностью классов в тестовой выборке (9 липом и 4 ALT), что привело к классификации всех случаев как липом (рис. 5, 6).

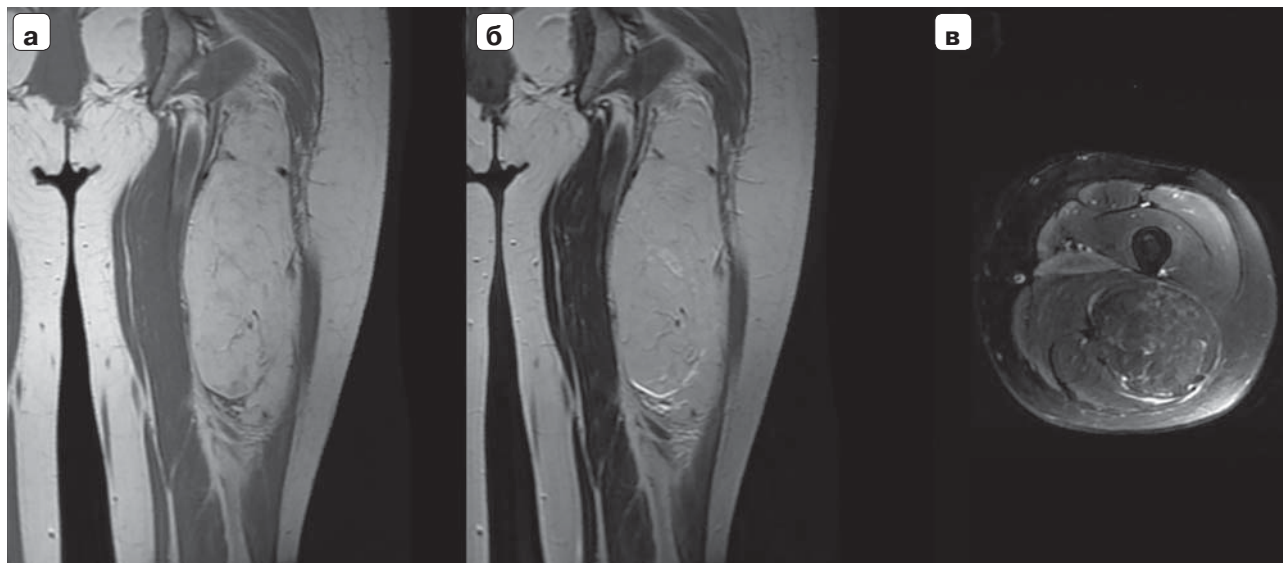
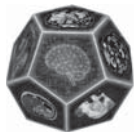


Рис. 3. Пациентка А., 30 лет, МРТ мягких тканей левого бедра с контрастным усилением. Гистологический диагноз: липома. **а** – изображение во фронтальной плоскости (T1-ВИ); **б** – во фронтальной плоскости (T2-ВИ); **в** – в аксиальной плоскости (T2-FS).

Fig. 3. Patient A, a 30-year-old female, contrast-enhanced MRI of soft tissues of the left thigh. Histological diagnosis: lipoma. **a** – coronal plane (T1-weighted image); **б** – coronal plane (T2-weighted image); **в** – axial plane (T2-weighted fat-suppressed image).

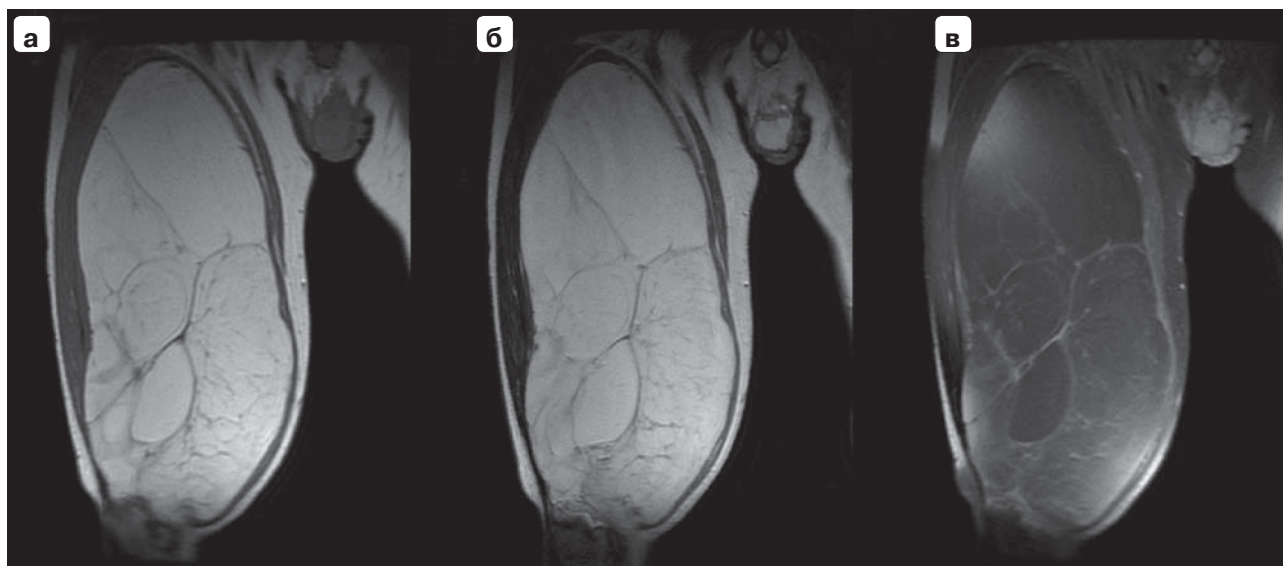


Рис. 4. Пациент Б., 71 год, МРТ мягких тканей правого бедра с контрастным усилением. Гистологический диагноз: ALT G1 T2NOM0. **а** – изображение во фронтальной плоскости (T1-ВИ); **б** – во фронтальной плоскости (T2-ВИ); **в** – во фронтальной плоскости (T1+C).

Fig. 4. Patient B, a 71-year-old male, contrast-enhanced MRI of soft tissues of the right thigh. Histological diagnosis: ALT (G1, T2NOM0). **a** – coronal plane (T1-weighted image); **б** – coronal plane (T2-weighted image); **в** – coronal plane (T1-weighted contrast-enhanced image).

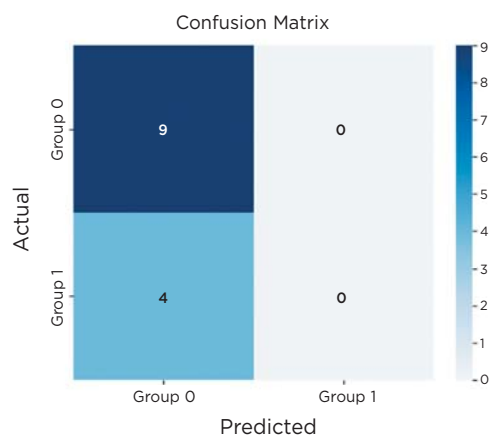
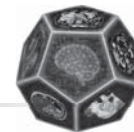


Рис. 5. Матрица ошибок для модели случайного леса.

Fig. 5. Confusion matrix for the random forest model.

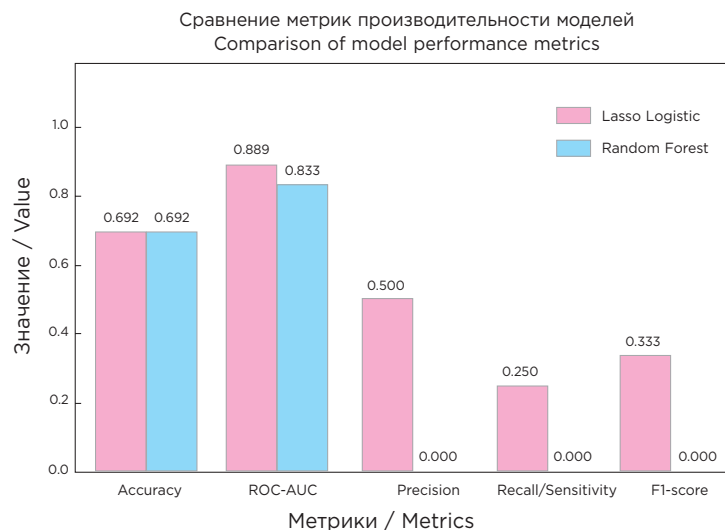


Рис. 6. Сравнение метрик производительности моделей.

Fig. 6. Comparison of model performance metrics.

Сравнение моделей. Статистически значимых различий между моделями не выявлено (тест Макнемара $p = 1,000$; тест Делонга $p = 0,771$). Бутстрап-анализ (1000 итераций) подтвердил стабильность показателей: для LASSO средняя ROC-AUC $0,892 \pm 0,101$, точность $0,691 \pm 0,131$; для случайного леса $0,832 \pm 0,153$ и $0,685 \pm 0,125$ соответственно. Согласованность предсказаний моделей составила 84,6% (рис. 7).

Лучший результат показала LASSO-модель: AUC-ROC 0,889, точность 0,692, чувствительность 0,250, специфичность 0,889. Для модели Random Forest значение AUC-ROC составило 0,833 при аналогичной точности. Различия между моделями не достигли статистической значимости ни по тесту Макнемара ($p = 1,0$), ни по тесту Делонга ($p = 0,771$).

Полученное в нашем исследовании значение AUC (0,889 для LASSO) сопоставимо с этими данны-

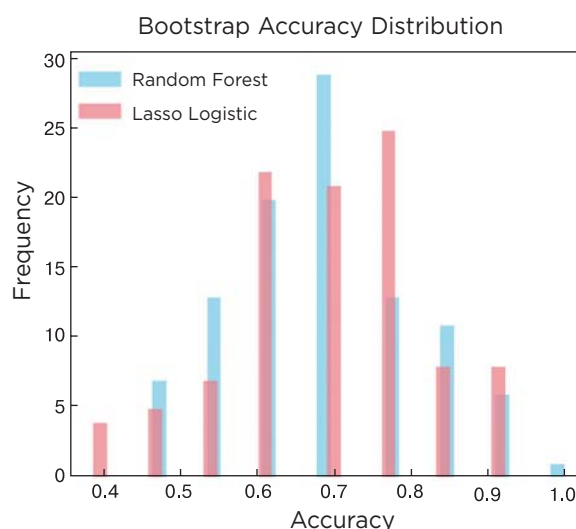
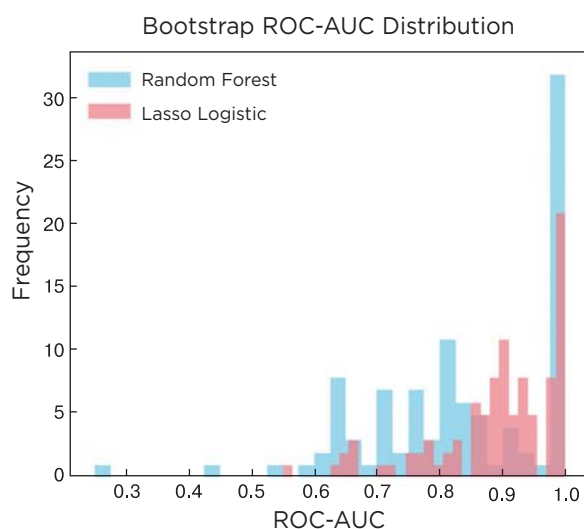


Рис. 7. Распределение показателей ROC-AUC (слева) и точности (справа) по результатам бутстрап-анализа (1000 итераций) для моделей LASSO-логистической регрессии и случайного леса. По оси X отображены значения соответствующих метрик, по оси Y – частота встречаемости (frequency). Синим цветом обозначена модель случайного леса (Random Forest), красным – LASSO-логистическая регрессия (Lasso Logistic).

Fig. 7. Distribution of ROC-AUC (left) and accuracy (right) metrics from bootstrap analysis (1000 iterations) for the LASSO logistic regression and random forest models. The x-axis shows the corresponding metric values, the y-axis shows frequency. The random forest model is shown in blue, and the LASSO logistic regression is shown in red.

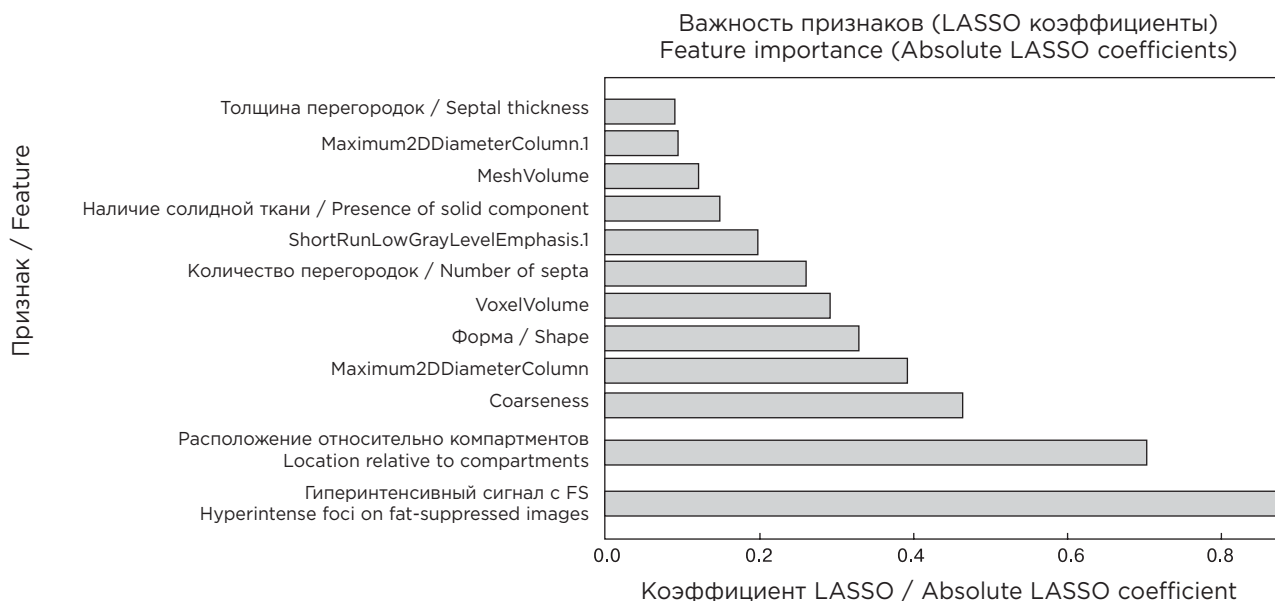
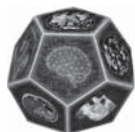


Рис. 8. Важность признаков по абсолютной величине коэффициентов LASSO-логистической регрессии.

Fig. 8. Feature importance based on the absolute values of the coefficients from the LASSO logistic regression model.

ми, однако чувствительность нашей модели существенно ниже (25% против 70%). Это расхождение объясняется прежде всего выраженным преобладанием липом над ALT в тестовой выборке: из 13 пациентов лишь 4 имели диагноз ALT, что делает оценку чувствительности крайне нестабильной при малом объеме данных.

Отбор признаков. LASSO-регрессия выделила 12 наиболее значимых признаков. Наибольшие по абсолютной величине коэффициенты имели семиотические характеристики: “гиперинтенсивный сигнал с FS” (0,877), “расположение относительно компартментов” (0,705), “форма” (0,331), а также радиомический признак Coarseness (0,465) (рис. 8).

Полный перечень отобранных признаков

Семиотические: “гиперинтенсивный сигнал с FS”, “расположение относительно компартментов”, “форма”, “количество перегородок”, “наличие солидной ткани”, “толщина перегородок”;

Радиомические: Coarseness (T1), Maximum2D DiameterColumn (T1), VoxelVolume (T1), ShortRunLow GrayLevelEmphasis.1 (T2), MeshVolume (T1), Maximum2DDiameterColumn.1 (T2).

Обсуждение

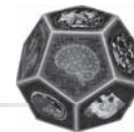
В настоящем исследовании были разработаны и сопоставлены две модели машинного обучения: логистическая регрессия (LASSO) и случайный лес (Random Forest). Целью их применения являлась

дифференциальная диагностика липом и атипичных липоматозных опухолей (ALT) на основе радиомических и семиотических признаков MPT. Выборка включала 61 пациента: 46 с липомами и 15 с ALT, что отражает значительное преобладание липом в представленной выборке.

Полученные значения AUC-ROC согласуются с результатами сопоставимых исследований. В работе S.C. Foreman и соавт. (2023) логистическая регрессия LASSO, обученная на признаках нескольких MPT-последовательностей (T2, T1 и контрастной T1 с FS), достигла AUC 0,88, чувствительности 70% и специфичности 81% на выборке из 257 пациентов [16].

В ретроспективном многоцентровом исследовании S. Gitto и соавт. (2023) на 150 пациентах из трех центров применяли 3D-сегментацию на T1- и T2-взвешенных MPT с последующим обучением трех классификаторов [17]. Лучшая модель – случайный лес (Random forest) показала: AUC 0,74, чувствительность 92%, специфичность 33% и предсказательная способность 89% на внешней тестовой выборке, что оказалось сопоставимо с данными опытного рентгенолога ($p = 0,474$). В нашем исследовании модель Random Forest при той же архитектуре продемонстрировала существенно более низкую чувствительность (0%) при специфичности 100%, что, по всей видимости, обусловлено малым числом пациентов с ALT в тестовой выборке ($n = 4$ из 13).

Исследование Y. Tang и соавт. (2022) включало данные 122 пациентов (90 липом и 32 ALT) с исполь-



зованием МР-томографа с напряженностью поля 3,0 Тл в режимах T1 и T2 с подавлением жира [18]. Соотношение групп составило примерно 3:1 в пользу липом, что близко к соотношению в нашем исследовании ($46:15 \approx 3:1$). Комбинированная радиомическая модель T1+T2 достигла AUC = 0,968 на тестовой выборке, превысив показатели моделей на отдельных последовательностях (AUC = 0,952 для T1 и 0,944 для T2). Эти результаты превышают показатели нашего исследования (AUC = 0,889 для LASSO и 0,833 для Random Forest), что объясняется прежде всего большим числом пациентов с ALT в работе Y. Tang и соавт. (32 против 15), а также использованием одной модели томографа, с большей напряженностью магнитного поля 3 Тл против 1,5 Тл.

В настоящем исследовании данные были получены на различных МРТ-аппаратах при условии использования единого стандартизированного протокола сканирования. N. Сау и соавт. (2022) подчеркивают, что использование единого стандартизированного протокола и однотипного аппарата являлось целенаправленным критерием включения в их исследование, поскольку это повышает воспроизводимость радиомических параметров и точность модели [19]. Таким образом, применение различных МРТ-аппаратов в нашей работе, несмотря на стандартизированный протокол, потенциально вносит дополнительную вариабельность в извлекаемые радиомические признаки и может снижать устойчивость модели.

Примечательно, что в числе наиболее весомых предикторов в нашей модели присутствуют семиотические признаки (гиперинтенсивный сигнал с FS, форма, количество перегородок), которые отражают визуальные характеристики опухолей. M. Vos и соавт. (2019) показали, что включение субъективно оцениваемых МРТ-признаков в комбинированную модель не улучшало ее относительно модели, основанной исключительно на количественных радиомических характеристиках изображений, поскольку такие признаки зависимы от наблюдателя и, следовательно, подвержены субъективности [20].

Ограничения

Настоящее исследование имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации полученных результатов. Общий объем выборки составил 61 пациента, что существенно уступает большинству сопоставимых радиомических исследований. Значительное преобладание липом над ALT (46 и 15 соответственно) привело к тому, что тестовая выборка включала лишь 4 пациента с ALT, что делает оценку чувствительности модели статистически нестабильной. Несмотря на использование стандартизированного протокола сканирова-

ния, применение нескольких МРТ-аппаратов различных производителей потенциально вносит дополнительную вариабельность в извлекаемые радиомические признаки. Помимо этого, исследование носит ретроспективный характер, внешняя валидация модели на независимой когорте не проводилась.

Заключение

В проведенном мультицентровом ретроспективном исследовании разработаны и валидированы прогностические модели дифференциальной диагностики липом и атипичных липоматозных опухолей (ALT) конечностей на основе клинико-семиотических и радиомических признаков бесконтрастной МРТ (T1- и T2-ВИ). Использование LASSO-логистической регрессии и случайного леса достигло сопоставимой эффективности (ROC-AUC 0,889 и 0,833 соответственно; $p > 0,05$). LASSO-регрессия выделила 12 наиболее значимых параметров, среди которых ключевую роль сыграли семиотические характеристики (“гиперинтенсивный сигнал с FS”, “расположение относительно компартментов”, “форма”, “наличие солидной ткани”) и радиомические параметры (Coarseness, Maximum2DDiameter Column). Нулевая чувствительность модели случайного леса на тестовой выборке с высокой вероятностью объясняется преобладанием липом в тестовой выборке и указывает на ограничения применения данного алгоритма при небольшом объеме данных.

Полученные результаты демонстрируют возможность использования радиомического подхода в сочетании с машинным обучением для неинвазивной верификации липоматозных образований мягких тканей. Но для использования необходимо провести дальнейшие исследования с привлечением более крупных выборок и проведением внешней валидации. Это, вероятно, сможет позволить определить истинную диагностическую ценность разработанных моделей и их применимость в клинической практике.

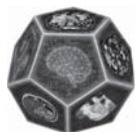
Дополнительная информация

Этическая экспертиза. Научное исследование было рассмотрено и одобрено независимым этическим комитетом при ФГБУ “РНЦРР” Минздрава России (выписка из протокола №7 от 03.10.2025). Все участники перед включением в исследование подписали письменное добровольное информированное согласие на использование обезличенных данных.

Участие авторов

Разработка дизайна исследования – Уразов А.В., Аксенова С.П., Нуднов Н.В., Харченко Н.В.

Получение данных для анализа, анализ полученных данных, статистическая обработка материала – Уразов А.В., Сергеев Н.И., Аксенова С.П., Нуднов Н.В.



Написание текста рукописи – Уразов А.В., Аксенова С.П.
Обзор публикаций по теме статьи – Уразов А.В., Аксенова С.П., Нуднов Н.В.

Authors' participation

Development of the study design – Urazov A.V., Aksenova S.P., Nudnov N.V., Kharchenko N.V.

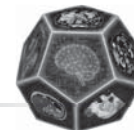
Obtaining data for analysis, analysis of the data obtained, statistical processing of the material – Urazov A.V., Sergeev N.I., Aksenova S.P., Nudnov N.V.

Writing the text of the manuscript – Urazov A.V., Aksenova S.P.

Review of publications on the topic of the article – Urazov A.V., Aksenova S.P., Nudnov N.V.

Список литературы [References]

1. Zhao J., Du W., Tao X. et al. Survival and prognostic factors among different types of liposarcomas based on SEER database. *Sci. Rep.* 2025; 15 (1): 1790. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85937-9>
2. Knebel C., Lenze U., Pohlig F. et al. Prognostic factors and outcome of Liposarcoma patients: a retrospective evaluation over 15 years. *BMC Cancer.* 2017; 17 (1): 410. <https://doi.org/10.1186/s12885-017-3398-y>
3. Jonczak E., Grossman J., Alessandrino F. et al. Liposarcoma: A Journey into a Rare Tumor's Epidemiology, Diagnosis, Pathophysiology, and Limitations of Current Therapies. *Cancers.* 2024; 16 (22): 3858. <https://doi.org/10.3390/cancers16223858>
4. Noebauer-Huhmann I.M., Vanhoenacker F.M., Vilanova J.C. et al. Soft tissue tumor imaging in adults: European Society of Musculoskeletal Radiology Guidelines 2023 – overview, and primary local imaging: how and where? *Eur. Radiol@* 2024; 34 (7): 4427–4437. <https://doi.org/10.1007/s00330-023-10425-5>
5. Состояние онкологической помощи населению России в 2024 году / Под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена - филиал ФГБУ "НМИЦ радиологии" Минздрава России, 2025. 275 с. ISBN 978-5-85502-309-1
Kaprin A.D., Starinskiy V.V., Shakhzadova A.O. (eds). *Sostoyanie onkologicheskoy pomoshchi naseleniyu Rossii v 2024 godu* [The State of Oncological Care for the Population of Russia in 2024]. Moscow: P.A. Herzen Moscow Oncology Research Institute – Branch of the FSBI "National Medical Research Radiological Centre" of the Ministry of Health of Russia, 2025. 275 p. ISBN 978-5-85502-309-1 (In Russian)
6. Клинические рекомендации. Саркомы мягких тканей. 2025. URL: https://cr.minzdrav.gov.ru/preview-cr/515_3 (дата обращения: 02.04.2026). Ministerstvo zdravookhraneniya Rossiyskoy Federatsii. *Klinicheskiye rekomendatsii. Sarkomy myagkikh tkaney* [Clinical Guidelines. Soft Tissue Sarcomas]. 2025. Available at: https://cr.minzdrav.gov.ru/preview-cr/515_3 (accessed: 02.04.2026). (In Russian)
7. Морозов А.К., Завадовская В.Д., Алексеева О.Г. и др. Лучевая диагностика заболеваний костей и суставов: национальное руководство. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2026: 615–625. ISBN 978-5-9704-8867-6. <https://doi.org/10.33029/9704-8867-6-DKS-2026-1-664>. EDN: NPVDLH
Morozov A.K., Zavadovskaya V.D., Alekseeva O.G. et al. *Luchevaya diagnostika zabolevaniy kostey i sustavov: natsionalnoye rukovodstvo* [Radiation Diagnosis of Bone and Joint Diseases: National Guidelines]. 2nd ed., revised and expanded. Moscow: GEOTAR-Media; 2026: 615–625. ISBN 978-5-9704-8867-6. <https://doi.org/10.33029/9704-8867-6-DKS-2026-1-664>. EDN: NPVDLH. (In Russian)
8. Natella R., Varriano G., Brunese M.C. et al. Increasing differential diagnosis between lipoma and liposarcoma through radiomics: a narrative review. *Explor. Targeted Anti-tum. Ther.* 2023; 4 (3): 498–510. <https://doi.org/10.37349/etat.2023.00147>
9. Burt A.M., Huang B.K. Imaging review of lipomatous musculoskeletal lesions. *Sicot J.* 2017; 3: 34. <https://doi.org/10.1051/sicotj/2017015>
10. Kransdorf M.J., Bancroft L.W., Peterson J.J. et al. Imaging of fatty tumors: distinction of lipoma and well-differentiated liposarcoma. *Radiology.* 2002; 224 (1): 99–104. <https://doi.org/10.1148/radiol.224101113>
11. Zhou X.P., Xing J.P., Sun L.B. et al. Molecular characteristics and systemic treatment options of liposarcoma: A systematic review. *Biomed. & Pharmacother.* 2024; 178: 117204. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2024.117204>
12. Dwianingsih E.K., Bawono R.G., Saputri A. et al. Histomorphological and molecular characteristics of liposarcoma (Review). *Oncol. Lett.* 2025; 30 (4): 454. <https://doi.org/10.3892/ol.2025.15200>
13. Lee A.T.J., Thway K., Huang P.H., Jones R.L. Clinical and molecular spectrum of liposarcoma. *J. Clin. Oncol.* 2018; 36 (2): 151–159. <https://doi.org/10.1200/JCO.2017.74.9598>
14. Malinauskaite I., Hofmeister J., Burgermeister S. et al. Radiomics and Machine Learning Differentiate Soft-Tissue Lipoma and Liposarcoma Better than Musculoskeletal Radiologists. *Sarcoma.* 2020: 7163453. <https://doi.org/10.1155/2020/7163453>
15. Нуднов Н.В., Харченко Н.В., Аксенова С.П. и др. Магнитно-резонансная томография в дифференциальной диагностике липом и липосарком мягких тканей. *Медицинская визуализация.* 2025; 29 (2): 72–87. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1533>
Nudnov N.V., Kharchenko N.V., Aksenova S.P. et al. *Magnetic resonance imaging in the differential diagnosis of soft tissue lipomas and liposarcomas. Medical Visualization.* 2025; 29 (2): 72–87. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1533>. (In Russian)
16. Foreman S.C., Llorián-Salvador O., David D.E. et al. Development and Evaluation of MR-Based Radiogenomic Models to Differentiate Atypical Lipomatous Tumors from Lipomas. *Cancers.* 2023; 15 (7): 2150. <https://doi.org/10.3390/cancers15072150>
17. Gitto S., Interlenghi M., Cuocolo R. et al. MRI radiomics-based machine learning for classification of deep-seated lipoma and atypical lipomatous tumor



- of the extremities. *La Radiologia Medica*. 2023; 128: 989–998. <https://doi.org/10.1007/s11547-023-01657-y>
18. Tang Y., Cui J., Zhu J., Fan G. Differentiation Between Lipomas and Atypical Lipomatous Tumors of the Extremities Using Radiomics. *J. Magn. Res. Imaging*. 2022; 56 (6): 1746–1754. <https://doi.org/10.1002/jmri.28167>
 19. Cay N., Mendi B.A.R., Batur H. et al. Discrimination of lipoma from atypical lipomatous tumor/well-differentiated liposarcoma using magnetic resonance imaging radiomics combined with machine learning. *Japanese J. Radiol.* 2022; 40 (9): 951–960. <https://doi.org/10.1007/s11604-022-01278-x>
 20. Vos M., Starmans M.P.A., Timbergen M.J.M. et al. Radiomics approach to distinguish between well differentiated liposarcomas and lipomas on MRI. *Br. J. Surg.* 2019; 106 (13): 1800–1809. <https://doi.org/10.1002/bjs.11410>

Для корреспонденции*: Уразов Александр Викторович – urazoff1432@yandex.ru

Уразов Александр Викторович – ассистент кафедры онкологии и рентгенодиагностики им. В.П. Харченко МИ ФГАОУ ВО “Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы” Минобрнауки России, Москва. <https://orcid.org/0009-0004-8226-2449>

Аксенова Светлана Павловна – канд. мед. наук, научный сотрудник лаборатории рентгенодиагностики научно-исследовательского отдела комплексной диагностики заболеваний и радиотерапии ФГБУ “Российский научный центр рентгенодиагностики” Минздрава России; ассистент кафедры онкологии и рентгенодиагностики им. В.П. Харченко ФГАОУ ВО “Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы” Минобрнауки России, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-2552-5754>

Нуднов Николай Васильевич – доктор мед. наук, профессор, заместитель директора по научной работе, заведующий научно-исследовательским отделом комплексной диагностики заболеваний и радиотерапии ФГБУ “Российский научный центр рентгенодиагностики” Минздрава России; профессор кафедры рентгенологии и радиологии ФГБОУ ДПО “Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования” Минздрава России; профессор кафедры онкологии и рентгенодиагностики им. В.П. Харченко ФГАОУ ВО “Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы” Минобрнауки России, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-5994-0468>

Харченко Наталья Владимировна – доктор мед. наук, профессор, профессор кафедры онкологии и рентгенодиагностики им. В.П. Харченко ФГАОУ ВО “Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы” Минобрнауки России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-5352-492X>

Сергеев Николай Иванович – доктор мед. наук, заведующий лабораторией рентгенодиагностики научно-исследовательского отдела комплексной диагностики заболеваний и радиотерапии ФГБУ “Российский научный центр рентгенодиагностики” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-4147-1928>

Contact*: Aleksandr V. Urazov – urazoff1432@yandex.ru

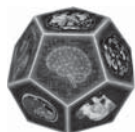
Aleksandr V. Urazov – Assistant Professor, Department of Oncology and Roentgenology named after V.P. Kharchenko, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University), Moscow. <https://orcid.org/0009-0004-8226-2449>

Svetlana P. Aksenova – Cand. of Sci. (Med.), research fellow, Russian Scientific Center of Roentgenoradiology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; Assistant Professor, Department of Oncology and Roentgenology named after V.P. Kharchenko, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University), Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-2552-5754>

Nikolay V. Nudnov – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Deputy Director for Scientific Work, Head of the Research Department for Complex Diagnostics of Diseases and Radiotherapy, Russian Scientific Center of Roentgenoradiology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; Professor, Department of Roentgenoradiology and Radiology, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; Professor, Department of Oncology and Radiology, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-5994-0468>

Natalia V. Kharchenko – Doct. of Sci. (Med.), Professor, professor of the Department of Oncology and Roentgenology named after V.P. Kharchenko, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University), Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-5352-492X>

Nikolay I. Sergeev – Doct. of Sci. (Med.), Head of the Laboratory of X-ray Radiology of the Research Department of Complex Diagnostics of Diseases and Radiotherapy of the Russian Scientific Center of Roentgenoradiology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-4147-1928>



Радиомические маркеры прогноза и ответа опухолей головы и шеи при применении химиолучевой и системной противоопухолевой терапии

© Борискина К.П.*, Нечаев В.А., Носова М.В., Стативко О.А., Покатаев И.А.

ГБУЗ города Москвы "Городская клиническая больница имени С.С. Юдина" Департамента здравоохранения города Москвы; 115446 Москва, Коломенский проезд, д. 4, Российская Федерация

Цель исследования: провести анализ научной литературы по возможностям радиомики в прогнозировании ответа и исходов у пациентов с опухолями головы и шеи, получающих системную противоопухолевую и химиолучевую терапию.

Материал и методы. Проведен поиск научных публикаций в базах данных PubMed и eLibrary по ключевым словам, связанным с радиомикой, системной терапией и опухолями головы и шеи. Отобраны оригинальные статьи за последние 10 лет, соответствующие критериям включения. Из 56 найденных публикаций после исключения нерелевантных работ в обзор включено 13 исследований, выполненных на данных КТ, МРТ и ПЭТ/КТ. Анализировались методы построения радиомических моделей, типы используемых признаков, их прогностическая и предиктивная ценность.

Результаты. Научный обзор показал, что радиомические модели обладают значительным потенциалом для прогнозирования выживаемости и ответа на индукционную, паллиативную противоопухолевую, а также химиолучевую терапию. Комбинированные клиничко-радиомические модели часто демонстрировали более высокую эффективность в сравнении с только радиомическими или клиническими. Перспективно использование алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта для оптимизации прогностических моделей.

Заключение. Радиомика представляет собой эффективный инструмент для персонализации системной терапии опухолей головы и шеи, позволяющий уже сегодня повысить точность прогнозирования и оптимизировать выбор лечебной тактики и уверенно обещающий дальнейший прогресс в будущем. Для массового внедрения в клиническую практику необходимы стандартизация методов, валидация моделей на крупных когортах и устранение технической, алгоритмической и программной гетерогенности исследований.

Ключевые слова: радиомика; опухоли головы и шеи; системная терапия; прогноз; машинное обучение; дельта-радиомика; КТ; МРТ; ПЭТ/КТ

Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Борискина К.П., Нечаев В.А., Носова М.В., Стативко О.А., Покатаев И.А. Радиомические маркеры прогноза и ответа опухолей головы и шеи при применении химиолучевой и системной противоопухолевой терапии. *Медицинская визуализация*. 2026; 30 (3): 136-143. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1622>

Поступила в редакцию: 19.12.2025.

Принята к печати: 29.06.2026.

Опубликована online: 29.09.2026.

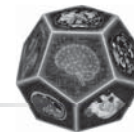
Prognostic and predictive radiomic markers in head and neck cancer patients receiving chemoradiotherapy and systemic therapy

© Ksenia P. Boriskina*, Valentin A. Nechaev, Margarita V. Nosova, Olesya A. Stativko, Ilya A. Pokataev

Yudin Moscow City Clinical Hospital; 4, Kolomenskiy proezd, Moscow 115446, Russian Federation

Objective: To analyze the scientific literature on the potential of radiomics for predicting treatment response and outcomes in patients with head and neck cancers receiving systemic anticancer therapy and chemoradiotherapy.

Materials and Methods. A literature search was conducted in the PubMed and eLIBRARY databases using keywords related to radiomics, systemic therapy and head and neck cancers. Original articles published over the past 10 years and



meeting the inclusion criteria were selected. Of the 56 publications initially identified, 13 studies were included in the final review after exclusion of irrelevant articles. These studies were based on CT, MRI, and PET/CT data. The analysis focused on radiomic model development methods, types of extracted features, and their prognostic and predictive value.

Results. The review demonstrated that radiomic models have substantial potential for predicting survival and treatment response to induction, palliative systemic therapy, as well as chemoradiotherapy. Combined clinical-radiomic models frequently were more effective compared with radiomic-only or clinical-only models. The use of machine learning and artificial intelligence algorithms was identified as a promising approach for optimizing prognostic models.

Conclusion. Radiomics represents a promising tool for personalizing systemic therapy in head and neck cancers, enabling improved prognostic accuracy and optimization of treatment strategies. Standardization of methodologies, validation of models in large cohorts, and reduction of technical heterogeneity across studies are required for successful clinical implementation.

Keywords: radiomics; head and neck cancer; systemic therapy; prognosis; machine learning; delta-radiomics; CT; MRI; PET/CT

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Boriskina K.P., Nechaev V.A., Nosova M.V., Stativko O.A., Pokataev I.A. Prognostic and predictive radiomic markers in head and neck cancer patients receiving chemoradiotherapy and systemic therapy. *Medical Visualization*. 2026; 30 (3): 136-143. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1622>

Received: 19.12.2025.

Accepted for publication: 29.06.2026.

Published online: 29.09.2026.

Список сокращений

ВБП – выживаемость без прогрессирования

Дельта-радиомика – направление радиомики, анализирующее изменение количественных признаков опухоли в разные временные точки (до, во время и после лечения) для предсказания ответа или токсичности

ИКД – истинный коэффициент диффузии

исследование baseline – первичное исследование перед началом лекарственной противоопухолевой терапии

КТ – компьютерная томография

MPT – магнитно-резонансная томография

ОВ – общая выживаемость

ПЭТ/КТ – позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с компьютерной томографией

AUC – Area Under the Curve (площадь под ROC-кривой; метрика качества и прогностической способности модели)

C-индекс – индекс конкордантности (мера согласованности предсказаний модели с реальными исходами, аналог AUC для анализа выживаемости)

DCR – disease control rate (частота контроля заболевания)

ENE – extranodal extension (экстранодальная инвазия; прорастание опухоли за капсулу лимфатического узла)

GLCM – Gray Level Co-occurrence Matrix (матрица совместной встречаемости уровней серого; текстурный признак)

GLDZM – Gray Level Distance Zone Matrix (матрица дистанций зон уровней серого; текстурный признак)

HPV – Human Papillomavirus (вирус папилломы человека)

iRECIST – Immunotherapy Response Evaluation Criteria in Solid Tumors (критерии оценки ответа солидных опухолей при иммунотерапии)

PD-L1 – Programmed Death-Ligand 1 (лиганд программируемой клеточной смерти 1; маркер для отбора на иммунотерапию)

Rad-score/R-score – Radiomics Risk Score, радиомическая шкала риска, интегральный показатель, рассчитанный на основе радиомических признаков

Random survival forest – алгоритм машинного обучения на основе случайного леса для анализа выживаемости

RECIST 1.1 – Response Evaluation Criteria in Solid Tumors (критерии оценки ответа солидных опухолей)

RUSSCO – Russian Society of Clinical Oncology (Российское общество клинической онкологии)

SUV – Standardized Uptake Value (стандартизованное значение накопления РФП)

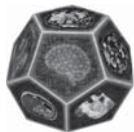
TPF – схема индукционной химиотерапии: доцетаксел + цисплатин + 5-фторурацил

XGBoost – Extreme Gradient Boosting (алгоритм машинного обучения на основе градиентного бустинга)

Введение

Опухоли головы и шеи занимают седьмое место по распространенности среди злокачественных новообразований с выявлением ежегодно около 890 000 новых случаев [1]. Среди опухолей данной локализации наиболее часто встречается плоскоклеточный рак полости рта, глотки и гортани с увеличением количества новых случаев за последние 10 лет [2, 3]. К особенностям данной нозологии можно отнести сложность анатомической структуры, комплексный подход к терапии и высокую вероятность осложнений в связи с частой коморбидностью пациентов [4].

По данным cancer-регистра в России в 2024 г. средний возраст пациентов с впервые выявленным раком глотки составил 61,1 года, а раком гортани – 64,2 года [5]. Тенденция к выявлению заболевания в более пожилом возрасте, безусловно, повышает риски наличия у пациентов сопутствующих заболеваний, осложняющих использование наиболее



эффективных лекарственных препаратов [6]. На момент установления диагноза более половины больных с локализацией опухоли в глотке и полости рта имеют местнораспространенный процесс, часто осложняющийся распадом и повышающий шанс наличия алиментарной недостаточности у пациентов [7, 8]. В сравнении с локальной стадией продолжительность жизни пациентов с распространенной опухолью в два раза ниже [7].

Лекарственная терапия применяется в лечении опухолей головы и шеи в качестве паллиативной при метастатическом процессе, неоадьювантной/индукционной при местнораспространенных формах, а также в качестве радиосенсибилизатора во время химиолучевой терапии [9]. Основные схемы химиотерапии для лечения опухолей данной локализации обладают высокой токсичностью, а выбор препаратов до сих пор вызывает дискуссии [6, 9].

При установлении диагноза рака головы и шеи проводятся КТ органов головы и шеи, грудной клетки, УЗИ лимфатических узлов и печени, эндоскопические методы исследования. Альтернативным томографическим методом может быть МРТ. ПЭТ/КТ применима при местнораспространенном плоскоклеточном раке с целью исключения отдаленного метастазирования, в случае отсутствия первичного очага и для оценки лимфатических узлов перед хирургическим лечением [9, 10].

Согласно Клиническим рекомендациям RUSSCO 2024 г., оценка ответа на индукционную, неоадьювантную и паллиативную лекарственную терапию по данным лучевых методов исследования осуществляется преимущественно на основании критериев RECIST1.1 или iRECIST. Однако учитывая частую геометрическую сложность первичного очага, наличие обширных зон некроза, малого размера пораженных лимфатических узлов, отсутствие всех трех зон сканирования при исследовании baseline в случае применения методов КТ и МРТ, вышеупомянутые критерии не являются оптимальными для оценки ответа в данной локализации [11].

Поиск дополнительных маркеров ответа и прогноза важен для повышения точности традиционных методов для возможных деэскалации или, напротив, усиления терапии, определения плана наблюдения после радикального лечения, облегчения диагностики рецидивов.

Радиомика позволяет исследовать большие объемы данных для извлечения из медицинских изображений количественных признаков, не видимых человеческому глазу. Это помогает выявлять новые предиктивные и прогностические маркеры для принятия решений в онкологической практике. Количество научных публикаций по радиомике в сфере рентгенологии, ядерной медицины и меди-

цинской визуализации с 2000 по 2021 г. увеличилось экспоненциально. В. Косак и соавт. при проведении библиометрического анализа в 2023 г. обнаружили более 5200 публикаций в данной области [12]. В последнее десятилетие в работах стали использоваться такие инструменты, как глубокое машинное обучение и искусственный интеллект, что позволило проводить анализ большого массива данных более эффективно. Популярной становится дельта-радиомика, анализирующая изменение объектов в разные временные точки, что может быть применимо для оценки изображений до и после лечения с целью предсказания ответа или нежелательных явлений терапии [13].

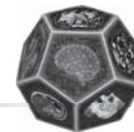
Радиомический анализ данных включает в себя предварительную обработку изображений, сегментацию опухоли из первичного томографического изображения, программно-вычислительное извлечение признаков, разработку модели и валидацию [14]. Радиомические признаки составляют три основные группы: морфологические (форма, размер), признаки первого порядка (параметры интенсивности) и признаки второго порядка (текстурные параметры) [15]. Интересна возможность сопоставления радиомических параметров и различных характеристик опухоли с выявлением клинически значимых корреляций, а также способность моделей предсказывать исходы заболеваний [16].

При опухолях головы и шеи радиомика может использоваться для диагностики и дифференциации типов опухолей, включая определение HPV-статуса, оценки молекулярных маркеров, стадирования, стратификации пациентов по риску рецидива, прогрессирования и общей выживаемости, мониторинга ответа на лечение, прогнозирования токсичности лучевой терапии [17–19].

Цель научного обзора: показать возможности радиомики в прогнозировании ответа и исходов у пациентов с опухолями головы и шеи, получающих системную противоопухолевую и химиолучевую терапию.

Материал и методы

Проведен поиск научных статей в базе данных PubMed с использованием поисковых терминов “radiomic*”, “image biomarker*”, “head and neck cancer”, “head and neck squamous cell carcinoma”, “HNSCC”, “oropharyngeal cancer”, “laryngeal cancer”, “hypopharyngeal cancer”, “systemic therapy”, “systemic treatment”, “chemotherapy”, “immunotherapy”, “targeted therapy”, “induction therapy”, “treatment response”, “therapy response”, “treatment outcome”, “response evaluation”, “treatment efficacy”, “prognosis”, “predict*”, “survival”, а также в базе данных elibrary – с использованием терминов “опухоли



головы и шеи”, “системная терапия”, “радиомика”. Отбирались оригинальные исследования, опубликованные за последние 10 лет. Критериями исключения являлись: применение только лучевой терапии (ЛТ), оценка токсичности лучевой терапии, хирургическое лечение, оценка патологического ответа, опухоли щитовидной железы и назофарингеальная карцинома, использование генеративного искусственного интеллекта, другие модальности, кроме КТ, ПЭТ, ПЭТ/КТ, МРТ, исследования не на английском и русском языках, исследования без открытого доступа (некоторые статьи были получены у авторов по запросу). Для научного обзора из 56 статей были отобраны 13 с наиболее полным представлением методик и полученных результатов радиомического исследования.

Радиомические маркеры прогноза при применении химиолучевой терапии

Химиолучевая терапия (ХЛТ) применяется для лечения местнораспространенных нерезектабельных опухолей головы и шеи, терапии местных рецидивов, а также в качестве адъювантной терапии при высоком риске прогрессирования резектабельной опухоли [10]. Высокодозный цисплатин, использующийся при ХЛТ, обладает достаточно высокой токсичностью, в связи с чем есть необходимость в поиске новых биомаркеров для деинтенсификации лечения [20].

G. Bruixola и соавт. построили клинические и комбинированную (клиническую + радиомическую) модели на основании анализа 171 КТ-исследования перед радикальной ХЛТ для предсказания выживаемости без прогрессирования (ВБП) и 5-летней ВБП пациентов с местнораспространенными опухолями головы и шеи. Наилучшая предсказательная способность была достигнута при использовании алгоритма Random survival forest с AUC 0,64 и индексом конкордантности (С-индекс) 0,66 на тестовой когорте [21]. Алгоритм XGBoost предсказывал 5-летнюю ВБП на основании 12 радиомических и 4 клинических параметров с AUC 0,74. Наиболее значимыми для 5-летней ВБП оказались текстурные признаки *emphasis* и *entropy*, отражающие гетерогенность опухоли, для ВБП – 2D-диаметр опухоли.

N.P. Brodin и соавт. исследовали данные ПЭТ/КТ 114 пациентов с местнораспространенным раком ротоглотки с целью предсказать ВБП и вероятность отдаленного метастазирования [22]. Из отобранных радиомических признаков только параметр *wavelet_LHL_GLDZM_LILDE* имел статистически значимую корреляцию с ВБП. Наибольшая эффективность при 5-фолдовой кросс-валидации была достигнута для комбинированной клинико-радиомической модели с AUC 0,73. Высокий Rad-score, возраст старше 65 лет

и HPV-негативный статус были ассоциированы с худшей выживаемостью пациентов.

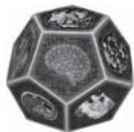
H. Bollen и соавт. определяли возможности радиомического анализа МР-изображений для прогнозирования локорегионарного контроля после проведения ЛТ/ХЛТ местнораспространенных опухолей ротоглотки [23]. Комбинированная клинико-радиомическая модель предсказывала локорегионарный контроль с С-индексом 0,72 на тренинговой и 0,56 на тестовой когорте. Значимыми предикторами были радиомический параметр *Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM)-correlation*, стадия заболевания и статус употребления алкоголя. При использовании дельта-радиомиомики С-индекс комбинированной модели достиг 0,74 на тренинговой и 0,63 на тестовой когорте.

Одна из работ продемонстрировала возможности радиомики для предсказания рецидива в регионарных лимфатических узлах на основании КТ до начала ЛТ/ХЛТ [24]. Всего было сегментировано 558 лимфатических узлов в тренинговой когорте и 467 – в тестовой. Из клинических факторов независимыми предикторами рецидива стали Т-категория, пол и общее состояние по ВОЗ, из радиомических – *least-axis-length* и *gray level co-occurrence matrix based-correlation*, отражающие размер и гетерогенность лимфатических узлов соответственно. Комбинированная модель показала большую эффективность в сравнении с клинической и радиомической с достижением С-индекса 0,80 в валидационной когорте.

Радиомические маркеры прогноза и ответа при применении индукционной терапии

Применение индукционной терапии при местнораспространенных опухолях головы и шеи является дискуссионным [9]. В реальной клинической практике проведение стандартной ХЛТ часто затруднено по причине возможности распада опухоли и неудовлетворительного соматического статуса пациентов [25]. При этом индукционная терапия снижает вероятность отдаленного метастазирования [26]. Стандартом индукционной терапии является схема TPF, однако в связи с высокой токсичностью оправдан поиск новых биомаркеров для отбора пациентов [27].

W. Lyu и соавт. исследовали радиомические МР-признаки у пациентов с HPV-позитивным раком ротоглотки как у наиболее благоприятной популяции пациентов с целью поиска биомаркеров для деинтенсификации лечения [28]. Пациенты разделялись на “хорошо и плохо ответивших” на лечение по принципу уменьшения суммы длинного диаметра первичной опухоли и коротких диаметров метаста-



тически измененных лимфатических узлов на 50%. Rad-score предсказал ответ на индукционную терапию с высокой эффективностью (AUC 0,89 для тренинговой когорты и AUC 0,71 для валидационной). Была прослежена корреляция Rad-score с МР-признаками: у пациентов с ответом более вероятно обнаруживались однородная интенсивность сигнала, четкие границы опухоли и экзофитный характер роста, менее вероятно – некроз и экстранодальный рост. На основании Rad-score и клинических факторов (TNM, ENE, большой стаж курения) были построены номограммы, разделившие пациентов на группы низкого и высокого риска со значимыми различиями в 3-летних общей выживаемости (ОВ) и ВБП.

М. Bologna и соавт. исследовали предиктивность ответа на индукционную терапию по МР-данным пациентов с синоназальным раком [29]. Объективным ответом на терапию считался полный и частичный ответ согласно критериям RECIST1.1, пациенты со стабилизацией и прогрессированием составляли группу “не ответивших”. Были построены моно- и мультимодальные радиомические модели с использованием T1-, T2-взвешенных изображений и ИКД-карт на основании нескольких машинных алгоритмов. Наиболее точно предсказывала ответ модель с включением данных из всех трех импульсных последовательностей с AUC 0,78.

Для предсказания прогноза пациентов после индукционной терапии активно исследуется дельта-радиомика. S.W. Su и соавт. на основании 59 КТ-исследований, выполненных до и после начала лечения рака гортаноглотки, построили радиомическую модель, предсказывающую ВПБ с AUC 0,77, предсказательная способность относительно ОВ не была доказана [30]. Авторы заключили, что пациенты с низким R-score составляют более благоприятную подгруппу и являются кандидатами для ХЛТ вместо тотальной ларингэктомии. S. Šediene и соавт. применили дельта-радиомику и машинное обучение для предсказания 3-летних ОВ и ВБП у пациентов с местнораспространенным раком головы и шеи на основании ПЭТ-КТ до и после индукционной терапии [31]. Модель дельта-радиомики оказалась более эффективной в сравнении с клинической и классической радиомической моделями. Наибольшую корреляцию с ОВ и временем до прогрессирования показали параметры GLCM_ContrastVariance, discretized_SUVstd и discretized_SUVskewness.

Кроме анализа первичного образования, имеются работы, включающие в себя исключительно оценку ответа лимфатических узлов. Так, M.H. Zhang и соавт. проанализировали КТ-исследования с 41 лимфатическим узлом для предсказания ответа опухоли на индукционную химиотаргетную тера-

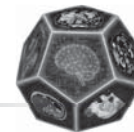
пию [32]. Таргетные лимфатические узлы подразделялись на “ответившие” и “не ответившие” по уменьшению объема на 66%. Для радиомической модели были отобраны три параметра: minimum pixel intensity и low gray level run emphasis ассоциировались с хорошим ответом, skewness – с плохим. Комбинированная модель, включающая радиомическую и клиническую (возраст, пол, T- и N-категории), показала наилучшую предсказательную способность с AUC 0,85 в тренинговой когорте и AUC 0,75 в тестовой когорте.

Применение радиомики при паллиативном лечении опухолей головы и шеи

Несмотря на появление новых препаратов, прогноз пациентов с метастатическим процессом и рецидивными опухолями остается неудовлетворительным со средней медианой ОВ 13 мес [33]. В настоящее время варианты лечения включают иммунотерапию, химиотаргетную терапию и химиотерапию. Выбор схемы лечения основывается на общем состоянии пациента, статусе PD-L1 (для иммунотерапии), истории предыдущих линий лечения [9]. Наиболее популярным направлением исследований в области радиомики у таких пациентов является поиск дополнительных предиктивных и прогностических маркеров для применения иммунотерапии [34].

Основными конечными точками исследования D.P. Zandberg и соавт. были предсказание ответа опухоли на основании RECIST 1.1 (disease control rate, DCR), ВБП, ОВ, а также оценка опухолевого микроокружения [35]. Практически у половины пациентов PD-L1 статус был неизвестен. Для каждого КТ-исследования производилась сегментация трех областей: первичная рецидивная опухоль, отдаленный метастаз и пораженный лимфатический узел. Радиомическая модель для предсказания ОВ строилась с помощью алгоритма машинного обучения XGBoost на основании 8 отобранных параметров. Была показана высокая эффективность модели в предсказании ОВ (AUC 0,74), ВБП (AUC 0,72) и DCR (AUC 0,71).

V.D.A. Corino и соавт. построили радиомическую модель для предсказания 10-месячной ОВ у пациентов, получавших иммунотерапию в рамках клинического исследования “Nivactor”, на основании КТ перед началом лечения [36]. PD-L1 статус был неизвестен примерно у трети пациентов и не участвовал в построении модели. Для анализа производилась сегментация наибольшего опухолевого очага. Модель обладала удовлетворительной эффективностью (AUC 0,67) и высокой точностью 0,82 (0,59–0,94) в тестовой когорте.



Y. Sim и соавт. извлекали радиомические признаки из T1-контрастных, T2-взвешенных изображений и ИКД-карт МР-исследований перед началом иммунотерапии для предсказания ОБ и ВБП [37]. На основании данных пациентов с известным PD-L1- статусом (59%) были построены клиническая и комбинированная клиничко-радиомическая модели. Все три модели обладали схожей слабой эффективностью с варьированием iAUC в тренировочных когортах для предсказания ОБ от 0,59 в клинической модели до 0,7 в комбинированной модели, для предсказания ВБП – от 0,60 в радиомической модели до 0,66 в комбинированной модели. Дополнительно авторы заключили, что радиомические параметры, отражающие меньший размер, более округлые контуры и большую гомогенность опухоли, ассоциированы с лучшим прогнозом пациентов на иммунотерапии.

H. Lu и соавт. анализировали контрастные T1-взвешенные МР-изображения 31 пациента с рефрактерностью к препаратам платины для предсказания ОБ. PD-L1-статус был известен у 30 пациентов [38]. Наибольшая корреляция со статусом пациента “жив-умер” во временном интервале 9 мес была показана для радиомических параметров Grey-level co-occurrence matrix-associated texture. Радиомическая модель разделила пациентов на группы высокого, промежуточного и низкого риска при предсказании одногодичной смертности с тенденцией к достижению AUC 0,875.

Заключение

Радиомика обладает большим потенциалом в области предсказания прогноза и ответа опухолей головы и шеи на системную терапию. Анализ включенных исследований показывает, что радиомические модели, основанные на данных КТ, МРТ и ПЭТ/КТ, способны дополнять существующие клинические и морфологические критерии, а в ряде случаев – превосходить их по предсказательной мощности. Наиболее перспективными направлениями являются построение комбинированных клиничко-радиомических моделей и использование дельта-радиомики для оценки динамики опухолевых изменений.

Радиомические параметры позволяют оценивать морфологические характеристики опухоли и лимфатических узлов, а также особенности опухолевого микроокружения, что может отражать биологическую агрессивность процесса и чувствительность к терапии. Полученные данные указывают на то, что радиомика как самостоятельный подход к анализу диагностических томографических изображений может стать ценным инструментом персонализации лечения – как для выбора режима химиолучевой

терапии и оптимизации индукционных подходов, так и для стратификации пациентов, потенциально отвечающих на иммунотерапию и таргетные препараты применительно к опухолям головы и шеи.

Тем не менее широкое внедрение радиомики в клиническую практику ограничено рядом факторов: гетерогенностью протоколов визуализации, различиями в сегментации, отсутствием стандартизированных подходов к извлечению и валидации признаков, а также малыми размерами выборок и использованием ретроспективных данных.

Дальнейшая стандартизация методологии и валидация моделей на больших когортах, особенно в практике отечественных учреждений, интенсивно развивающих радиомику как метод, являются ключевыми шагами для возможности использования данного инструмента в клинической практике и важнейшим направлением развития российской лучевой диагностики.

Участие авторов

Борискина К.П. – концепция и дизайн исследования, проведение исследования, сбор и обработка данных, обзор публикаций по теме статьи, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста, подготовка и редактирование текста, подготовка, создание опубликованной работы, ответственность за целостность всех частей статьи.

Нечаев В.А. – концепция и дизайн исследования, анализ и интерпретация полученных данных, подготовка и редактирование текста, утверждение окончательного варианта статьи

Носова М.В. – обзор публикаций по теме статьи, подготовка и редактирование текста

Стативко О.А. – подготовка и редактирование текста, участие в научном дизайне

Покатаев И.А. – участие в научном дизайне, утверждение окончательного варианта статьи.

Authors' participation

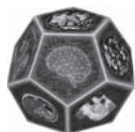
Boriskina K.P. – concept and design of the study, conducting research, collection and analysis of data, review of publications, analysis and interpretation of the obtained data, writing text, text preparation and editing, preparation and creation of the published work, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Nechaev V.A. – concept and design of the study, conducting research, analysis and interpretation of the obtained data, text preparation and editing, approval of the final version of the article.

Nosova M.V. – review of publications, text preparation and editing, approval of the final version of the article.

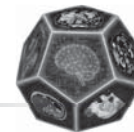
Stativko O.A. – text preparation and editing, approval of the final version of the article.

Pokataev I.A. – participation in scientific design, approval of the final version of the article.



Список литературы [References]

1. Barsouk A., Aluru J.S., Rawla P. et al. Epidemiology, Risk Factors, and Prevention of Head and Neck Squamous Cell Carcinoma. *Med. Sci. Basel Switz.* 2023; 11 (2): 42. <https://doi.org/10.3390/medsci11020042>
2. Johnson D.E., Burtneiss B., Leemans C.R. et al. Head and neck squamous cell carcinoma. *Nat. Rev. Dis. Primer.* 2020; 6 (1): 92. <https://doi.org/10.1038/s41572-020-00224-3>
3. American Cancer Society. Cancer Facts & Figures 2025. Atlanta: American Cancer Society; 2025.
4. Machiels J.P., René Leemans C., Golusinski W. et al. Squamous cell carcinoma of the oral cavity, larynx, oropharynx and hypopharynx: EHNS-ESMO-ESTRO Clinical Practice Guidelines for diagnosis, treatment and follow-up†. *Ann. Oncol.* 2020; 31 (11): 1462-1475. <https://doi.org/10.1016/j.annonc.2020.07.011>
5. Каприн А.Д. Злокачественные новообразования в России в 2024 году (заболеваемость) / Под ред. А.Д. Каприна и др. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава России, 2025. 178 с.
Kaprin A.D. Malignant neoplasms in Russia in 2024 (incidence) / Eds A.D. Kaprin et al. Moscow: P.A. Herzen Moscow Oncology Research Institute – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, 2025. 178 p. (In Russian)
6. Szturcz P., Haddad R.I., Posner M., Vermorken J.B. Navigating challenging patient factors in systemic therapy for head and neck cancer. *The Oncologist.* 2025; 30 (5): oyaf035. <https://doi.org/10.1093/oncolo/oyaf035>
7. SEER*Explorer: An interactive website for SEER cancer statistics [Internet]. Surveillance Research Program, National Cancer Institute; 2025 Jul 2. [cited 2025 Dec 14]. Available from: <https://seer.cancer.gov/statistics-network/explorer/>. Data source(s): SEER Incidence Data, November 2024 Submission (1975–2022), SEER 21 registries.
8. Ehrsson Y.T., Langius-Eklöf A., Laurell G. Nutritional surveillance and weight loss in head and neck cancer patients. *Support Care Cancer.* 2012; 20 (4): 757-765. <https://doi.org/10.1007/s00520-011-1146-4>
9. National Comprehensive Cancer Network. (2025). Head and neck cancer (version 5.2025). Retrieved from https://www.nccn.org/professionals/physician_gls/pdf/head-and-neck.pdf
10. Болотина Л.В., Владимиров Л.Ю., Деньгина Н.В., Кутукова С.И., Новик А.В., Романов И.С. Опухоли головы и шеи. *Malign. Tumours.* 2023; 13 (3s2-1): 100-119. <https://doi.org/10.18027/2224-5057-2023-13-3s2-1-100-119>
Bolotina L.V., Vladimirova L.Yu., Dengina N.V. et al. Head and neck tumors. *Malign. Tumours.* 2023; 13(3s2-1): 100–119. <https://doi.org/10.18027/2224-5057-2023-13-3s2-1-100-119> (In Russian)
11. Kale P., Datta S., Kalbande P. et al. Is it time to move from the Unidimensional RECIST 1.1 Response Assessment Criteria to a Volumetric Evaluation in the Present Era of Image-based Oncology? An Evaluation in Locally Advanced Head Neck Cancers Undergoing Treatment. *Clin. Oncol.* 2024; 36 (10): 615-623. <https://doi.org/10.1016/j.clon.2024.07.006>
12. Kocak B., Baessler B., Cuocolo R. et al. Trends and statistics of artificial intelligence and radiomics research in Radiology, Nuclear Medicine, and Medical Imaging: bibliometric analysis. *Eur. Radiol.* 2023; 33 (11): 7542-7555. <https://doi.org/10.1007/s00330-023-09772-0>
13. Nardone V., Reginelli A., Grassi R. et al. Delta radiomics: a systematic review. *Radiol. Med. (Torino).* 2021; 126 (12): 1571-1583. <https://doi.org/10.1007/s11547-021-01436-7>
14. Larue R.T.H.M., Defraene G., De Ruyscher D. et al. Quantitative radiomics studies for tissue characterization: a review of technology and methodological procedures. *Br. J. Radiol.* 2017; 90 (1070): 20160665. <https://doi.org/10.1259/bjr.20160665>
15. Shur J.D., Doran S.J., Kumar S. et al. Radiomics in Oncology: A Practical Guide. *RadioGraphics.* 2021; 41(6):1717-1732. <https://doi.org/10.1148/rg.2021210037>
16. Vasilev Y.A., Nanova O.G., Blokhin I.A. et al. Priority radiomic parameters for computed tomography of head and neck malignancies: A systematic review. *Dig. Diagnostics.* 2024; 5 (2): 255-268. <https://doi.org/10.17816/DD623240>
17. Romeo V., Cuocolo R., Ricciardi C. et al. Prediction of Tumor Grade and Nodal Status in Oropharyngeal and Oral Cavity Squamous-cell Carcinoma Using a Radiomic Approach. *Anticancer Res.* 2020; 40 (1): 271-280. <https://doi.org/10.21873/anticancer.13949>
18. Chiesa-Estomba C.M., Mayo-Yanez M., Guntinas-Lichius O. et al. Radiomics in Hypopharyngeal Cancer Management: A State-of-the-Art Review. *Biomedicines.* 2023; 11 (3): 805. <https://doi.org/10.3390/biomedicines11030805>
19. Marcu D.C., Grava C., Marcu L.G. Current Role of Delta Radiomics in Head and Neck Oncology. *Int. J. Mol. Sci.* 2023; 24 (3): 2214. <https://doi.org/10.3390/ijms24032214>
20. Rühle A., Weymann M., Behrens M. et al. Predicting cisplatin tolerability in older adults with head and neck cancer – Insights for improved chemoradiation outcomes. *Radiother. Oncol.* 2025; 204: 110697. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2024.110697>
21. Bruixola G., Dualde-Beltrán D., Jimenez-Pastor A. et al. CT-based clinical-radiomics model to predict progression and drive clinical applicability in locally advanced head and neck cancer. *Eur. Radiol.* 2024; 35 (7): 4277-4288. <https://doi.org/10.1007/s00330-024-11301-6>
22. Brodin N.P., Velten C., Lubin J. et al. A positron emission tomography radiomic signature for distant metastases risk in oropharyngeal cancer patients treated with definitive chemoradiotherapy. *Phys. Imaging Radiat. Oncol.* 2022; 21: 72-77. <https://doi.org/10.1016/j.phro.2022.02.005>
23. Bollen H., Dok R., De Keyser F. et al. Improving outcome prediction in oropharyngeal carcinoma through the integration of diffusion-weighted magnetic resonance imaging radiomics. *Phys. Imaging Radiat. Oncol.* 2025; 34: 100759. <https://doi.org/10.1016/j.phro.2025.100759>
24. Zhai T.T., Langendijk J.A., Van Dijk L.V. et al. Pre-treatment radiomic features predict individual lymph node failure for head and neck cancer patients. *Radiother. Oncol.* 2020; 146: 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2020.02.005>



25. Stativko O.A., Pokataev I.A., Kravtsov S.A. et al. First results of a multicenter, non-randomized, prospective phase II study of the efficacy and safety of induction therapy with pembrolizumab, cisplatin, and 5-fluorouracil in patients with unresectable squamous cell carcinoma of the oropharynx, hypopharynx and larynx. *J. Mod. Oncol.* 2025; 26 (4): 447–453. <https://doi.org/10.26442/18151434.2024.4.203019>
26. Hanna G.J., Haddad R.I., Lorch J.H. Induction chemotherapy for locoregionally advanced head and neck cancer: past, present, future? *The Oncologist.* 2013; 18 (3): 288–293. <https://doi.org/10.1634/theoncologist.2012-0286>
27. Janoray G., Pointreau Y., Garaud P. et al. Long-Term Results of a Multicenter Randomized Phase III Trial of Induction Chemotherapy With Cisplatin, 5-fluorouracil, ± Docetaxel for Larynx Preservation. *J. Natl. Cancer Inst.* 2016; 108 (4): djv368. <https://doi.org/10.1093/jnci/djv368>
28. Lyu W., Gong J., Zhu L. et al. MR radiomics unveils neoadjuvant chemo-responsiveness with insights into selective treatment de-intensification in HPV-positive oropharyngeal carcinoma. *Oral. Oncol.* 2024; 159: 107049. <https://doi.org/10.1016/j.oraloncology.2024.107049>
29. Bologna M., Calareso G., Resteghini C. et al. Relevance of apparent diffusion coefficient features for a radiomics-based prediction of response to induction chemotherapy in sinonasal cancer. *NMR Biomed.* 2022; 35 (4): e4265. <https://doi.org/10.1002/nbm.4265>
30. Su C.W., Lee J.C., Chang Y.F. et al. Delta-volume radiomics of induction chemotherapy to predict outcome of subsequent chemoradiotherapy for locally advanced hypopharyngeal cancer. *Tumori J.* 2022; 108 (5): 450–460. <https://doi.org/10.1177/03008916211039018>
31. Šedienė S., Kulakienė I., Urbonavičius B.G. et al. Development of a Model Based on Delta-Radiomic Features for the Optimization of Head and Neck Squamous Cell Carcinoma Patient Treatment. *Medicina (Mex.)*. 2023; 59 (6): 1173. <https://doi.org/10.3390/medicina59061173>
32. Zhang M.H., Cao D., Ginat D.T. Radiomic Model Predicts Lymph Node Response to Induction Chemotherapy in Locally Advanced Head and Neck Cancer. *Diagn. Basel Switz.* 2021; 11 (4): 588. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11040588>
33. Harrington K.J., Burtneiss B., Greil R. et al. Pembrolizumab With or Without Chemotherapy in Recurrent or Metastatic Head and Neck Squamous Cell Carcinoma: Updated Results of the Phase III KEYNOTE-048 Study. *J. Clin. Oncol.* 2023; 41 (4): 790–802. <https://doi.org/10.1200/JCO.21.02508>
34. Rai P., Mahajan A. Radiomics in head and neck squamous cell carcinoma – a leap towards precision oncology. *J. Immunother. Cancer.* 2025; 13 (4): e011692. <https://doi.org/10.1136/jitc-2025-011692>
35. Zandberg D.P., Zenkin S., Ak M. et al. Evaluation of radiomics as a predictor of efficacy and the tumor immune microenvironment in anti-PD-1 MAB treated recurrent/metastatic squamous cell carcinoma of the head and neck patients. *Head Neck.* 2025; 47 (1): 129–138. <https://doi.org/10.1002/hed.27878>
36. Corino V.D.A., Bologna M., Calareso G. et al. A CT-Based Radiomic Signature Can Be Prognostic for 10-Months Overall Survival in Metastatic Tumors Treated with Nivolumab: An Exploratory Study. *Diagnostics.* 2021; 11 (6): 979. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11060979>
37. Sim Y., Sohn B., Kim S. et al. Radiomics and PD-L1 expression predict immunotherapy benefits in patients with head and neck squamous cell carcinoma. *Future Oncol.* 2024; 20 (36): 2869–2878. <https://doi.org/10.1080/14796694.2024.2342226>
38. Lu H., Shen C., Chiu Y. et al. Radiomic biomarkers for platinum-refractory head and neck cancer in the era of immunotherapy. *Oral. Dis.* 2024; 30 (7): 4220–4230. <https://doi.org/10.1111/odi.14854>

Для корреспонденции*: Борискина Ксения Петровна – e-mail: yakimovichkse@gmail.com

Борискина Ксения Петровна – врач-рентгенолог отделения лучевой диагностики ГБУЗ города Москвы “ГКБ имени С.С. Юдина ДЗМ”, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-1950-2188>

Нечаев Валентин Александрович – канд. мед. наук, заведующий центром комплексной диагностики – врач-рентгенолог отделения лучевой диагностики ГБУЗ города Москвы “ГКБ имени С.С. Юдина ДЗМ”, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-6716-5593>

Носова Маргарита Владимировна – врач-химиотерапевт химиотерапевтического отделения №4 ЦАОП СВАО ГБУЗ города Москвы “ГКБ имени С.С. Юдина ДЗМ”, Москва. <https://orcid.org/0009-0003-0622-2528>

Стативко Олеся Алексеевна – заведующая химиотерапевтическим отделением №4 ЦАОП СВАО ГБУЗ города Москвы “ГКБ имени С.С. Юдина ДЗМ”, Москва. <https://orcid.org/0009-0002-1084-1551>

Покатаев Илья Анатольевич – доктор мед. наук, заместитель главного врача по медицинской части и научно-образовательной работе, руководитель службы химиотерапевтического лечения ГБУЗ города Москвы “ГКБ имени С.С. Юдина ДЗМ”, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-9864-3837>

Contact*: Ksenia P. Boriskina – e-mail: yakimovichkse@gmail.com

Ksenia P. Boriskina – Radiologist of the radiation diagnostics department, Yudin Moscow City Clinical Hospital, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-1950-2188>

Valentin A. Nechaev – Cand. of Sci. (Med.), Head of the Comprehensive Diagnostics Center – Radiologist of the Radiation Diagnostics Department, Yudin Moscow City Clinical Hospital, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-6716-5593>

Margarita V. Nosova – Chemotherapist of chemotherapy department No. 4 Outpatient Oncology Care Center of the North-Eastern Administrative Okrug, Yudin Moscow City Clinical Hospital, Moscow. <https://orcid.org/0009-0003-0622-2528>

Olesya A. Stativko – Head of Chemotherapy Department No. 4 Outpatient Oncology Care Center of the North-Eastern Administrative Okrug, Yudin Moscow City Clinical Hospital, Moscow. <https://orcid.org/0009-0002-1084-1551>

Ilya A. Pokataev – Doct. of Sci. (Med.), Deputy Chief Physician for Medical Affairs and Scientific and Educational Work, Head of the Chemotherapy Treatment Service, Yudin Moscow City Clinical Hospital, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-9864-3837>